

鋼製橋脚を有する連続高架橋の橋脚間地盤における 応答加速度に着目した解析的検討

葛西昭¹, 宇佐美勉², 河村康文³, 羽生満広⁴

¹ 正会員 修(工) 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)
³ 正会員 修(工) 日本鋼管株式会社 (〒514-0393 三重県津市雲出鋼管町 1)
⁴ 学生会員 名古屋大学 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)

1. 緒言

土木構造物の耐震設計は、今後、終局限界状態を考慮した性能照査型設計法へと変遷を遂げていくものと考えられる。鋼橋に関しては、文献 1) で耐震設計の現状紹介、および、数多くの研究課題をまとめている。その中には、橋梁システムの耐震設計法に対する課題も挙げられており、橋梁全体の耐震性能を総合的に判断する手法が必要であるとされている。

本研究は、橋梁システムとして上部構造一下部構造一基礎を一体でとらえた際の鋼製橋脚に生ずる応答値に着目するものである。これは、耐震設計での要求性能を求める過程に相当する。鋼製橋脚の要求性能を求める手法は、文献 1) にまとめられている。本研究では、この手法の内、局部座屈を考慮しない弾塑性地震応答解析による方法に、上部構造一下部構造一基礎の動的相互作用を考慮し、要求性能を判断する上で連成効果が及ぼす影響を明らかにすること、及び、橋脚基部に入力される加速度分布に関する考察を行うことを目的としている。具体的には、橋脚が 2 基あるいは 3 基存在する橋梁システムに対して弾塑性地震応答解析を行い、連成効果の影響を検討したものである。なお、鋼製橋脚を対象とし、杭基礎を有する橋脚を想定した。

2. 弾塑性地震応答解析手法に関する諸元

2.1 解析モデルの概要

本研究では、構造物一地盤の連成効果を取り込むために、地盤部分も有限要素分割を行った構造物一地盤を一体として弾塑性地震応答解析を行う。以下で、その解析モデルの概要をまとめておく。

表-1 地盤パラメータ

層番号	1	2
地盤の種類	粘性土	砂質土
層厚 H_s (m)	15.0	5.0
単位体積重量 γ_s (kN/m ³)	17.6	19.6
ポアソン比 ν_s	0.47	0.47
減衰定数 h_s	0.02	0.02
平均 N 値	5	50
せん断波速度 V_s (m/s)	171	295
せん断弾性係数 G_s (MPa)	52.6	174
粘着力 c (kPa)	29.4	-
せん断抵抗角 ϕ (度)	0	-

a) 地盤一体型モデル

図-1(a)に示すモデルは、地盤部分を有限要素分割によって模擬した解析モデルである。このモデルを地盤一体型モデルと呼ぶことにする。地盤一体型モデルでは、地盤要素に平面ひずみ要素を用い、側面および底面には ABAQUS²⁾に準備されている無限要素で無限性を模擬した。地盤は、表-1に示す表層地盤と基盤の 2 層地盤を仮定し、表層地盤は N 値=5 を仮定して地盤物性値を算出し、材料非線形として Mohr-Coulomb 則を適用した。基盤は砂層とし、材料非線形性は考慮しなかった。なお、橋梁部分は、次節で述べる地盤固定モデルを用いる。

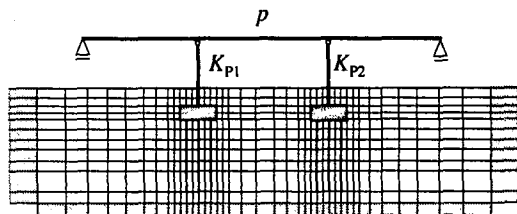
b) 地盤固定モデル

図-1(b)は、上部構造および橋脚のみを解析対象とした場合に用いられる解析モデルで、ここでは地盤固定モデルと称しておく。ここで、 p =上部構造の単位長さあたりの重量、 K_{P1} 、 K_{P2} =橋脚の剛性である。

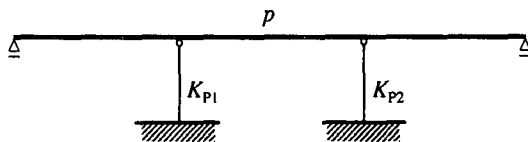
本研究で解析対象とした構造形式は、鋼製橋脚 2 基あるいは 3 基からなる 3、4 径間連続橋である。ただし、図-1(b)は 3 径間連続橋を例として示している。

表-2 橋脚パラメータ

地盤種	II 種地盤
使用鋼種	SM490
ヤング率 $E(\text{GPa})$	206
ポアソン比 ν	0.30
降伏応力 $\sigma_y(\text{MPa})$	314
断面形状	正方形補剛箱形
設計水平震度 k_{h0}	0.25
フランジ幅 $b(=d)(\text{m})$	1.46
板厚 $t(\text{mm})$	21
補剛材長さ $b_s(\text{m})$	0.16
補剛材板厚 $t_s(\text{mm})$	20
幅厚比パラメータ R_f	0.35
細長比パラメータ λ	0.45
アスペクト比 l_d/b	1.0
橋脚高さ $h(\text{m})$	10.48
降伏荷重 $H_y(\text{MN})$	1.69
降伏変位 $\delta_y(\text{mm})$	71.4



(a) 地盤一体型モデル



(b) 地盤固定モデル

図-1 解析モデル

上部構造部分と鋼製橋脚部分のみからなっており、上部構造両端部は移動支承で、橋脚と上部構造の接合部は鋼製支承を仮定している。鋼製橋脚に使用される鋼材は SM490 材のみとし、断面形状は正方形補剛箱形断面である。橋脚部には弾塑性状態を表す構成則として、名古屋大学で開発されている修正 2 曲面モデル³⁾を用いる。具体的な構造パラメータについては、表-2を参照されたい。

2.2 数値解析方法

地震応答解析を行う際には、汎用構造解析用プログラム ABAQUS²⁾を用いた。直接時間積分法で線形加速度法を適用し、時間間隔は初期時間増分を 0.001 秒とし、自動時間増分制御により、最大時間増分 0.01 秒以内で解析を行った。

減衰定数は、橋脚および桁部分などの上部構造には 0.05 とし、杭基礎部分は 0.10、地盤部分は 0.02 とした。減衰マトリクスについては、Rayleigh 減衰とし、1 次、

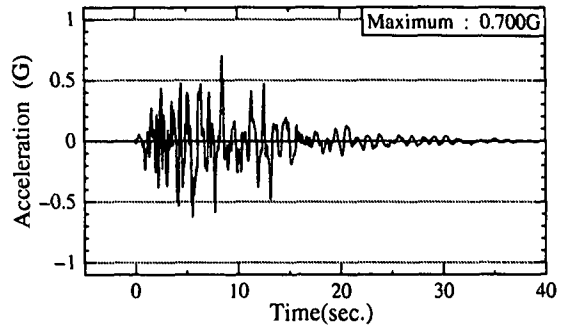


図-2 入力地震動 (地盤固定モデル)

2 次の固有周期をもとに作成した。その際に必要となるモード比例型減衰定数は、各要素で減衰定数が異なっているため、複合モーダル減衰として、運動エネルギーに比例するように求めた。

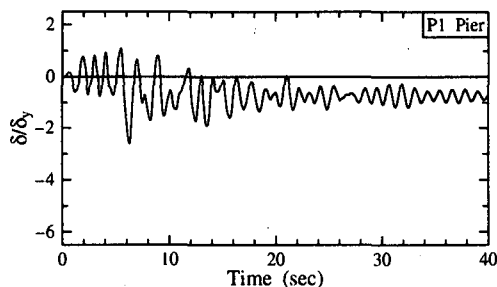
入力地震動はレベル 2 タイプ II 地震動のうち、JRT-NS-M (波形は図-2 を参照) を用いた。入力地震動は、地盤固定モデルとの比較検討を行うために、地盤固定モデルでは、そのままの波形を用いることとし、地盤一体型モデルでは、FDEL⁴⁾を用いて、自由地盤の地表面で原波形が得られるように、基盤面での加速度波形を求めている。なお、等価線形化法では、せん断剛性および減衰定数にひずみ依存特性を必要とするが、これらは、文献 5) を参考にした。

3. 3 径間連続橋を対象とした地震応答解析

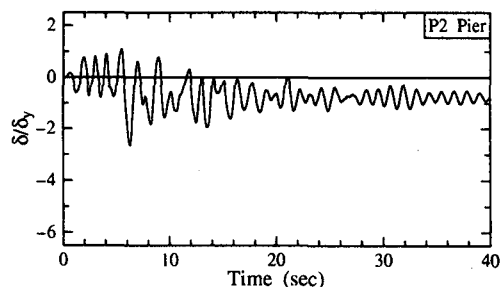
3 径間連続橋に対する解析結果は、文献 6) に記載されている。ここでは、その結果の内、次節で述べる 4 径間連続橋との比較に必要な部分をまとめておく。

文献 6) では、地盤条件を解析領域の右と左で N 値に変化を与えて解析を行っている。左側橋脚を P1、右側橋脚を P2 として、地盤一体型モデルによる応答解析結果のうち、橋脚頂部の応答時刻歴を図-3 に示す。なお、縦軸は降伏変位 δ_y によって無次元化されている。また、P2 側の周辺地盤の N 値を変化させた場合の橋脚頂部変位の最大応答変位および基部周辺における最大加速度をまとめたものを、図-4 に示す。

図-4 は、橋脚頂部の最大応答変位および橋脚基部および両橋脚基部中間点における水平方向最大応答加速度をまとめたものである。(a) が最大応答変位に関して、縦軸が最大応答変位を表し、横軸は水平方向の位置を表している。(b) は、最大応答加速度に関してであり、縦軸に最大加速度としており、横軸には、(a) と同様水平方向位置を示すことになるが、両橋脚間の中間点でも加速度をまとめている。図-4(a) により、右側地盤の N 値が大きくなるに連れて、各橋脚の最大応答変位も大きくなっており、N 値の差が大きいほど、両橋脚の最大応答変位に差がついている。図-4(b) によ

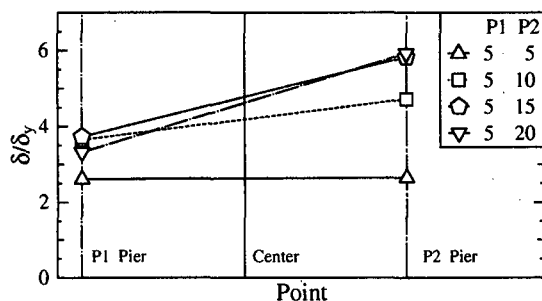


(a) 時刻歴 (P1)

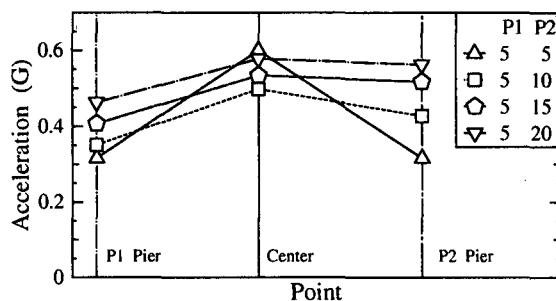


(b) 時刻歴 (P2)

図-3 3径間連続橋における各橋脚の応答時刻歴



(a) 最大応答変位



(b) 最大加速度

図-4 不整形地盤における最大応答分布

ると、両橋脚基部間の中央での最大加速度は、各橋脚基部の値を上回っている。

4. 4径間連続橋を対象とした地震応答解析

文献6)で、確認した加速度の増幅効果を4径間連続橋にて検討した。なお、ここでは、橋梁システムの固有周期による影響も見するために、橋梁システムの固有周期 T を $T=0.5(s)$ 、 $1.0(s)$ のモデルを準備した。また、ここでの検討では N 値は一定とした。

図-5は、各橋脚の応答時刻歴をまとめたもので、縦軸及び横軸は図-3と同様である。なお、ここでまとめている橋脚頂部の応答変位は、橋脚基礎との水平方向の相対変位であることを注記しておく。この図を見ると前節と同様、整形地盤であるので、各橋脚の応答はほぼ一致している。橋梁システムの固有周期による応答の違いとしては、固有周期の短い $T=0.5$ の場合の方が大きくなっている。この点については、固有周期による種々の検討が必要であるが、文献7)に橋脚1基に対する検討がある。

地盤内の応答加速度に着目すると、図-6のようにまとめられる。図-6は、橋脚基部における最大応答加速度および同深さにおける橋脚間中央の最大応答加速度をプロットしたものである。この図によると、橋脚間における応答加速度が大きくなる現象は、前節と同様であるが、中央の橋脚が、その他の橋脚に比べて、若干、加速度が大きくなり入力されている。本研究では、2

次元解析によって、地盤内の応答を求めている。従って、橋軸直角方向への逸散効果を過小評価している可能性が示唆できる。つまり、杭基礎による振動の反射が生じている可能性がある。この点については、3次元解析によって補完が必要である。

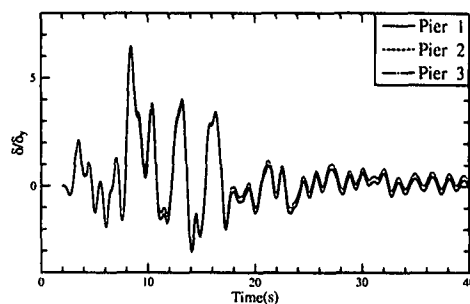
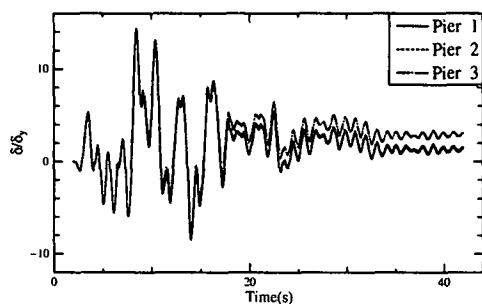
5. 結言

本研究は、多径間連続橋の地震時挙動を見る際に、地盤および基礎の効果を考慮することによる影響を調べるため、地盤一体型モデルを用いて検討したものである。以下に結果をまとめる。

- ① 各橋脚を支持する地盤の N 値が異なる不整形地盤の場合、橋脚の応答は比較的堅い地盤の応答に依存し、それによる慣性力および基盤より伝わる地震力の相互作用により、応答変位が大きくなる。
- ② 橋脚基礎間の地盤には加速度の増幅効果がある。
- ③ 4径間連続橋でも同種の成果を得た。

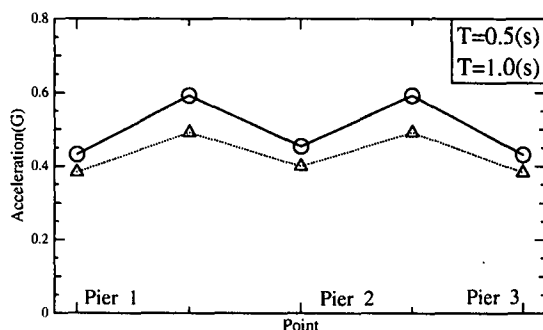
今後の課題

橋梁システム全体として、地震時挙動を推定した場合、本論文のような橋脚の応答値（ここでは、最大応答変位）の推定値は、地盤部分の取り扱いの方法によって異なってくる。本論文では、特に地盤部分の非線形性として Mohr-Coulomb 則を適用したが、構成則の違いによってさらに橋脚の応答値は変化することが予想



(a) 応答時刻歴（橋梁システムの固有周期 $T=0.5(s)$ ） (b) 応答時刻歴（橋梁システムの固有周期 $T=1.0(s)$ ）

図－ 5 4 径間連続橋における各橋脚の応答時刻歴



図－ 6 加速度分布

できる。従って、構成則の違いによる影響および橋梁部分の固有周期に関するパラメトリックスタディを必要とする。

また、本研究では地盤部分を2次元でとらえた解析を行っている。地盤内に発生する加速度分布は、3次元解析によってより精緻な解が得られるので、3次元解析による本研究の精度向上が必要である。さらに、本研究で得られた加速度の増幅効果を利用した橋梁設計に対する方策を考えることが必要である。

参考文献

- 1) 宇佐美勉・織田博孝：鋼構造物の耐震解析法および耐震照査法に関する研究展望，土木学会論文集，No.668/I-54，pp.1-16，2001.1.
- 2) Habbitt, Karlsson & Sorensen, Inc. : ABAQUS User's Manual, Version 5.8, Vol.I~III, 1998.
- 3) 坂野茂，宇佐美勉，水野英二：修正二曲面モデルによる板要素の繰り返し圧縮・引張弾塑性有限変位解析，土木学会論文集，No.525/I-33，pp.1-15，1995.
- 4) 杉戸真太，合田尚義，増田民夫：周波数特性を考慮した等価ひずみによる地盤の地震応答解析法に関する一考察，土木学会論文集，No.493/III-27，pp.49-58，1994.
- 5) 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.
- 6) 葛西昭，宇佐美勉，河村康文：鋼製橋脚－地盤間の連成効果を考慮した連続高架橋の地震時挙動，第4回鋼構造物の非線形数値解析と耐震設計への応用に関する論文集，2002.1.（掲載予定）
- 7) 葛西昭，河村康文，宇佐美勉：鋼製橋脚－基礎－地盤連成系の大地震時挙動，土木学会構造工学論文集，Vol.46A，pp.745-756，2000.3.