

斜杭基礎を有する橋脚の周辺地盤の影響を考慮した振動特性に関する一考察

A consideration of vibration characteristics of bridge Pier with tapered circular pile group considering ground motion effect

(株) 長大 ○正会員 高畑智考 (Tomochika TAKAHATA)
 (株) 長大 正会員 長谷川正 (Tadashi HASEGAWA)
 (独) 土木研究所寒地土木研究所 正会員 西 弘明 (Hiroaki NISHI)
 (独) 土木研究所寒地土木研究所 正会員 佐藤 京 (Takashi SATO)
 室蘭工業大学 フェロー 岸 徳光 (Norimitsu KISHI)

1. はじめに

橋梁構造物の地震時応答性状に関しては、橋脚柱の振動特性に加え、基礎-地盤系の相互作用を適切に評価する必要があると考えられる。

著者らはこれまでに、基礎-地盤系の動的相互作用を比較的簡易に評価可能なバネ-質点系骨組要素モデル(以下、骨組要素モデル)の適用性について検討を行い、三次元有限要素モデル(以下、固体要素モデル)との比較により、基礎-地盤系のみをモデル化した条件下において、ほぼ同様の応答性状を示す結果が得られた。^{1) 2) 3)}

本研究では、これまでの結果を踏まえ、モデル化の範囲を橋脚柱まで拡張することで、橋梁の耐震性能を評価する上で重要な部材となる橋脚柱の応答性状を把握することを目的とした検討を行った。

検討対象としたのは、昭和50年代以前、軟弱地盤地域で比較的多く見られた斜杭基礎を有するRC橋脚である。

なお、本検討においても、骨組要素モデルの適用性を検討するために、別途実施した固体要素モデルを用いた応答解析結果との比較を行っている。

2. 解析対象橋脚の概要

解析対象は、昭和39年鋼道路橋示方書に準拠して耐震設計された既設橋梁である。橋梁諸元は以下の通りである。

上部工形式は、5径間連続鋼合成鈹桁2連、単純鋼合成鈹桁2連、バランスド・ランガー橋1連、3径間連続鋼合成鈹桁1連で構成されている。

基礎工形式は、5径間連続鋼合成鈹桁部が鋼管杭斜杭基礎、バランスド・ランガー橋部がニューマチックケーソン基礎、3径間連続鋼合成鈹桁部が場所打ち杭基礎である。

本検討では、対象橋梁のうち、地震時に複雑な挙動を示すことが想定される鋼管杭斜杭基礎を有する円形断面RC橋脚を解析対象とした。

図-1には、解析対象橋脚の概要図を示している。

本橋脚は、直径3.8m、高さ8.0mの円形断面コンクリート製橋脚である。杭基礎は、全長37m、直径812.8mm、板厚12.7mm(杭頭から8.81m下方位置で板厚を9.5mmに段落し)の鋼管杭基礎であり、12本の杭を $\theta=12.5^\circ$ の角度で放射状に配置した斜杭基礎である。

ここで、図中の地層構成は、平成17年度に当該地点で実施された地質調査結果に基づいて設定している。表-1には地質調査に基づく地層構成および平均N値を示している。

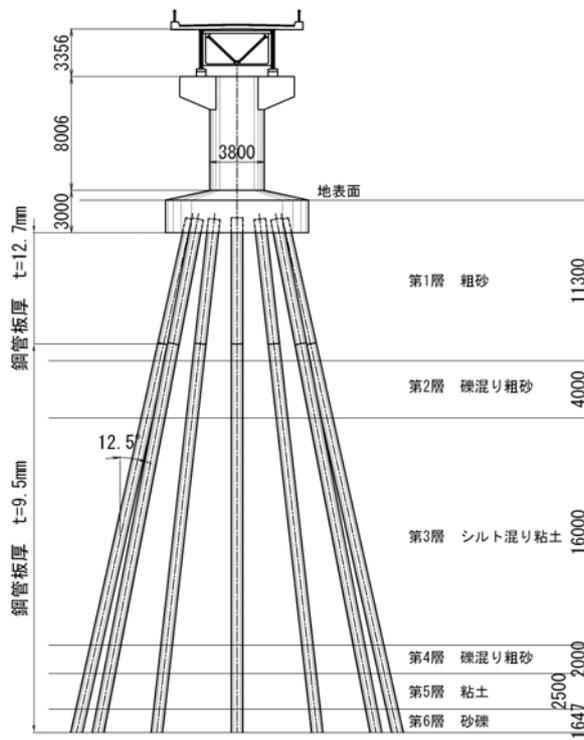


図-1 解析対象橋脚概要図

表-1 地質調査による地層構成および平均N値

| 地層番号 | 土質 | 地層厚 | 平均N値 |
|------|---------|------|------|
| 第1層 | 粗砂 | 11.3 | 10 |
| 第2層 | 礫混り粘土 | 4.0 | 30 |
| 第3層 | シルト混り粘土 | 16.0 | 10 |
| 第4層 | 礫混り粘土 | 2.0 | 8 |
| 第5層 | 粘土 | 2.5 | 9 |
| 第6層 | 砂礫 | 1.6 | 50 |

また、本橋脚は5径間連続鋼鈹桁を支持しており、地震時にはオイルダンパーにて各下部工に慣性力を分担させる構造であるため、地震時に分担する上部工質量は死荷重反力相当($W_u=5,400\text{kN}$)によるものとした。

2. 解析概要

本解析では、基礎と地盤の動的相互作用を考慮した橋脚柱および基礎の地震時における動的応答特性を把握する

ことを目的としていることから、上部工については支承条件（橋軸方向：ピン）および質量のみをモデル化するものとした。なお、本解析で用いた動的応答解析プログラムは、骨組要素解析に関してはMIDAS/Civil2006、固体要素解析に関してはABAQUSである。

3. 1 骨組要素モデル概要

図-2には、本解析で用いた骨組要素モデルの概要図を示している。

底版、橋脚柱および鋼管杭には弾性梁要素を用い、周辺地盤は質量およびせん断剛性のみを考慮したマスーバネモデルを用いてモデル化を行った。なお、地盤の質量、せん断バネは各杭に分担させるものとし、地盤の質点が同一の挙動を示すように、同一の深さに位置する各地盤質点を剛体連結する構造とした。解析対象とする地盤範囲は底版長さの5倍である50m×50mの範囲とした。

また、杭体一周辺地盤間の相互作用効果を考慮することから、杭体一周辺地盤間に対しても弾性バネ要素を用いて結合している。

境界条件は杭基礎下端を完全固定とし、地震波入力方向（橋軸方向）に対して直角方向の並進方向成分および回転方向成分を拘束している。上部工荷重は、上部工慣性力作用高に相当する位置に死荷重として5,400kNの質量を集中化して与えている。

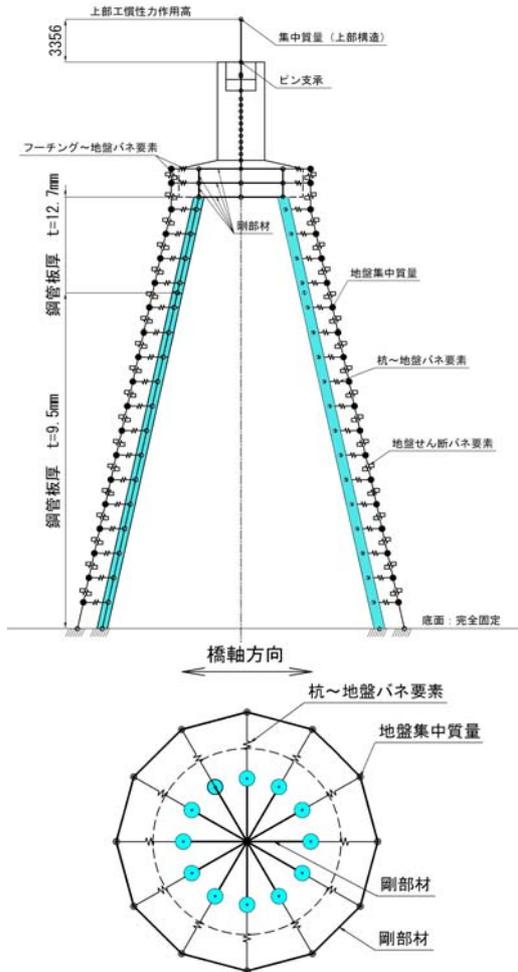


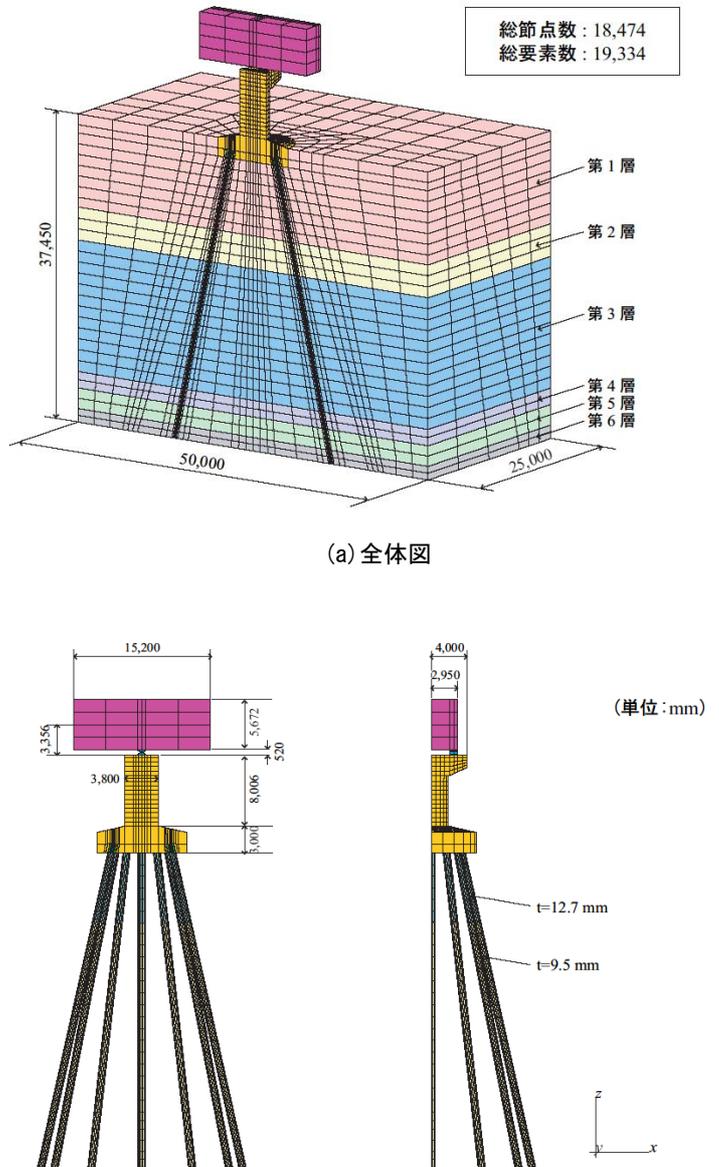
図-2 骨組要素解析モデル概要図

3. 2 固体要素モデル概要

図-3には固体要素モデルの要素分割状況概要図を示している。使用要素は、上部工、橋脚、底版部および地盤部には8節点固体要素を、鋼管杭は4節点シェル要素を用いている。また、橋脚天端位置にはピン支承をモデル化している。地盤の解析対象範囲は、鋼管杭の影響を考慮して、底版幅の5倍の領域とし、対称性を考慮して1/2のモデルとした。

また、ピン支承の上には上部工（自重：5,400kN）の1/2に相当する質量を固体要素を用いて付加している。

境界条件は、モデル底面を完全固定（鋼管杭部の底面は回転も拘束）とし、対象面には対象条件を、他の側面は鉛直方向変位成分を拘束している。なお、橋軸方向地震動入力に対するモデルの場合には、上部工の桁底面を鉛直方向変位のみ拘束している。



(a) 全体図

(b) 橋脚、底版および鋼管杭部

図-3 固体要素解析モデル概要図

3. 3 材料物性値

表-2には、RC部材（橋脚柱および底版）、鋼管杭の材料特性値を示している。

また、表-3には、周辺地盤の各地層における材料物性値を示している。地盤の弾性係数（動の変形係数）は、道路橋示方書V耐震設計編に基づいて各地層の平均N値からせん断弾性波速度を算定し、これから動的せん断変形係数を求めて地盤の動の変形係数Eを推定した。

表-2 橋脚柱および鋼管杭の材料物性値

| 部材 | 弾性係数 E (MPa) | ポアソン比 ν | 単位体積重量 γ (kN/m ³) |
|------|-----------------|----------------|---|
| RC部材 | 3.00E+04 | 0.20 | 24.5 |
| 鋼管杭 | 2.00E+05 | 0.30 | 77.0 |

表-3 周辺地盤の材料物性値

| 地層番号 | 弾性係数 E (N/mm ²) | ポアソン比 ν_D | 単位体積重量 γ (kN/m ³) |
|------|--------------------------------|------------------|---|
| 第1層 | 73.1 | 0.493 | 19.1 |
| 第2層 | 254.5 | 0.487 | 19.0 |
| 第3層 | 203.9 | 0.491 | 16.7 |
| 第4層 | 254.5 | 0.487 | 19.0 |
| 第5層 | 303.3 | 0.488 | 17.4 |
| 第6層 | 898.1 | 0.477 | 19.1 |

3. 地震応答解析法および入力地震動

地震応答解析は、骨組要素モデル、固体要素モデルともに直接積分法による時刻歴応答解析（線形解析）とした。

線形時刻歴応答解析の解析条件は、以下のように設定している。まず、骨組要素モデルには Newmark- β 法（ $\beta=1/4$ ）を適用し、減衰はReyleigh型として1次および2次の固有振動数に対して $h=5\%$ を与えている。一方、有限要素モデルにはモード重ね合わせ法を適用し、減衰は質量比例型として1次の固有振動数に対して $h=5\%$ を与えている。また、地震動は何れも解析モデルの下端に入力している。

図-4には、本解析に用いた入力地震動を示している。本解析では、2003年に発生した十勝沖地震時に十勝河口橋の基盤で観測された加速度波形の橋軸方向波形を基に、P波部分を除き、最大値を100galに振幅調整した加速度波形を使用した。なお、解析には算出された173secの波形のうち、主要動の30s間について解析を行った。

図-5には入力加速度波形のフーリエスペクトルを示している。図より、本地震波形は0.3Hz~0.4Hz付近に卓越振動数が存在していることがわかる。

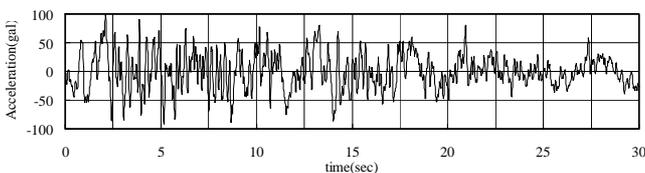


図-4 入力加速度波形

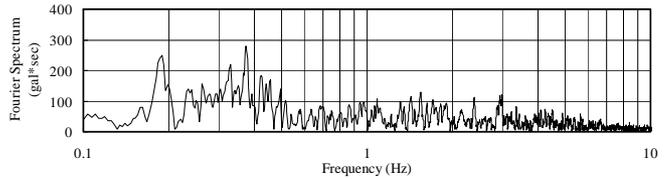


図-5 入力加速度波形のフーリエスペクトル

4. 数値解析結果の比較

4. 1 固有値解析

表-4には骨組要素モデルおよび固体要素モデルにおける固有振動数を示している。表より、1次固有振動数については、両者は良く一致していることがわかる。

また、2次、3次固有振動数については、骨組要素モデルが高めの値を示していることがわかる。

図-6には骨組み要素モデルにおける最低次固有振動モードを示している。図より、最低次振動モードは、周辺地盤と杭体が一体となって水平方向に変形し、地盤のせん断剛性が大きく変化する第2層付近で屈曲点を有するモード分布を示している。

表-4 固有振動解析における固有振動数

| | 固有振動次数 | 固有振動数 (Hz) |
|-------------|--------|------------|
| 骨組要素 モデル | 1次 | 1.292 |
| | 2次 | 2.922 |
| | 3次 | 3.411 |
| 固体要素 モデル | 1次 | 1.301 |
| | 2次 | 2.304 |
| | 3次 | 2.384 |

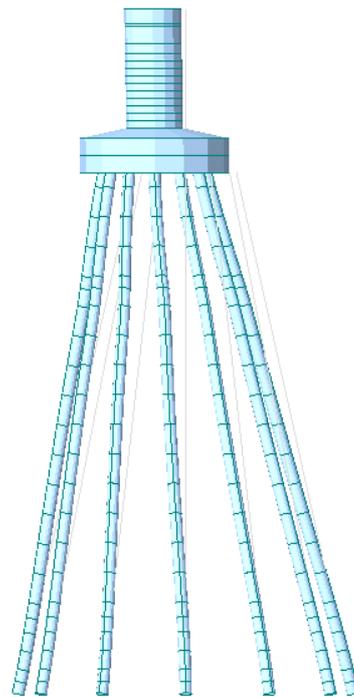
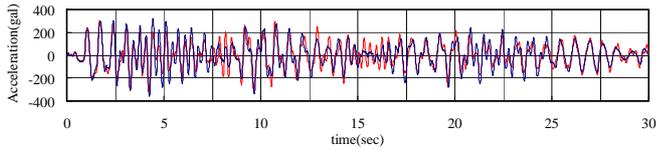
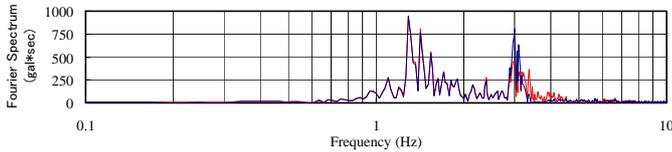


図-6 1次固有振動モード図（骨組要素モデル）

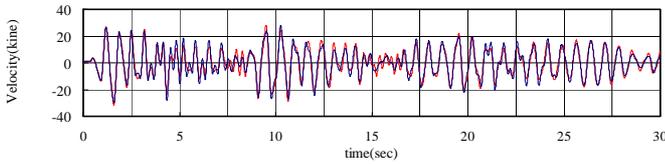
— : 骨組要素解析 — : 固体要素解析



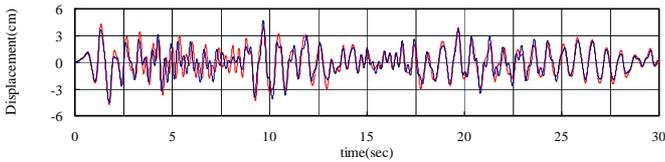
(a) 底版上面 相対応答加速度波形



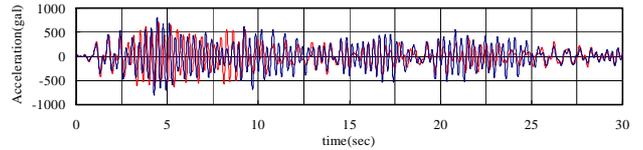
(b) 底版上面 相対応答加速度フーリエスペクトル



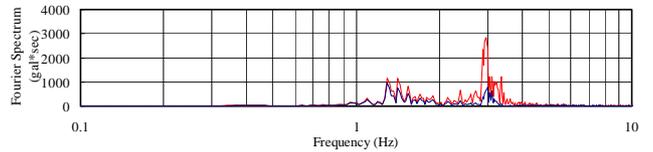
(c) 底版上面 相対応答速度波形



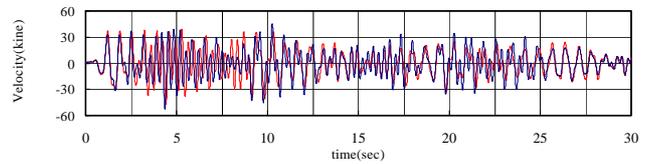
(d) 底版上面 相対応答変位波形
図-7 底版上面 応答波形



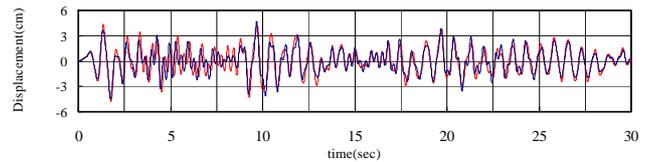
(a) 橋脚天端 相対応答加速度波形



(b) 橋脚天端 相対応答加速度フーリエスペクトル



(c) 橋脚天端 相対応答速度波形



(d) 橋脚天端 相対応答変位波形
図-8 橋脚天端 応答波形

4. 2 線形時刻歴応答解析

図-7 および図-8 には、底版上面位置および橋脚天端における加速度、速度、変位の各応答波形を骨組要素モデルと固体要素モデルで比較して示している。

相対応答加速度波形に着目すると、底版上面の応答波形は両モデルで応答性状および振幅レベルが良く一致しているが、橋脚上面の応答波形は、振幅レベルはほぼ一致するが、 $t=5\sim 10\text{sec}$ 付近で応答性状に差異が見られる。

次に相対応答速度波形および相対応答変位波形については、底版上面の応答波形は両モデルで応答性状、振幅レベルともに良く一致しているのに対して、橋脚天端の応答波形は、相対応答加速度波形と同様に振幅レベルは両モデルでほぼ一致するが、応答性状に若干の差異が見られる。

以上から、橋脚-基礎-地盤系の線形時刻歴応答解析に対して、骨組要素モデルを適用することで、固体要素モデルの解析結果を比較的良く再現できる結果が得られた。

5. まとめ

周辺地盤を多質点系せん断バネモデルで表現し、斜杭基礎と周辺地盤を相互作用バネで連結した骨組要素モデルおよび有限要素モデルを用いた固有値解析ならびに線形時刻歴応答解析を実施し、斜杭基礎を有する橋脚の応答解析に対する骨組要素モデルの適用性について、比較検討を

行った。

本検討により、橋脚および杭を線形はり要素、周辺地盤を質点とせん断バネでモデル化し、杭基礎と地盤のモデルを相互作用バネで連結した比較的簡易な骨組モデルを用いることで、三次元有限要素モデルによる応答解析結果を概ね再現可能であることが確認された。

なお、本検討は線形モデルを用いた解析としているため、基礎～地盤系の非線形性の適用に関しては、更に検討が必要である。

参考文献

- 1) 新石狩大橋斜杭基礎の動的応答に関する一考察, 土木学会北海道支部年次技術発表会論文集, vol. 64 A-76, 2007. 2
- 2) 斜杭基礎を有する橋脚基礎の動的応答に関する一考察, 土木学会全国大会年次学術講演会論文集, vol. 63 I-558, 2007. 9
- 3) 斜杭を有する橋脚の基礎-地盤系を考慮した動的挙動に関する一考察, 土木学会全国大会年次学術講演会論文集, vol. 64 I-106, 2008. 9