

群杭基礎を有する橋脚—基礎—地盤系の地震応答解析法に関する一考察

Earthquake response analysis of pier-foundation-soil system having rectangular pile group considering ground motion

株式会社ドーコン	〇正会員	工藤 浩史 (Hiroshi KUDO)
株式会社ドーコン	正会員	小林 竜太 (Ryuta KOBAYASHI)
株式会社ドーコン	正会員	千賀 規宏 (Norihito SENGU)
土木研究所寒地土木研究所	正会員	西 弘明 (Hiroaki NISHI)
土木研究所寒地土木研究所	正会員	岡田 慎哉 (Shinya OKADA)
室蘭工業大学	フェロー	岸 徳光 (Norimitsu KISHI)

1. はじめに

構造物の地震時応答は、基礎構造や周辺地盤の影響を大きく受けることから、実態に近い動的挙動を精度良く予測するためには基礎—地盤系における動的な相互作用効果を考慮した連成地震応答解析が必要となる。ここで、周辺地盤の影響を考慮した連成解析モデルとしては、二次元あるいは三次元の有限要素モデル、骨組要素モデル、Penzien 型（バネ—質点系）モデル等が挙げられる。

解析精度の観点からは、対象とする構造物を忠実にモデル化した有限要素モデルの適用が望ましいものと考えられるが、解析規模の増大に伴う解析所要時間の飛躍的な増加等の理由から、全てにおいて有限要素モデルを適用することは現実的に困難であり、実務設計においてもその適用事例が少ないのが現状である。従って、実務への適用性に配慮した場合には、比較的簡易でかつ適用事例の多い骨組要素モデルによって評価可能な数値解析モデルの構築が望ましいものと考えられる。

このような観点から、本研究では道路橋における一般的な群杭基礎を有する橋脚を対象として、橋脚—基礎—地盤系モデルの動的な相互作用効果を考慮した骨組要素モデルの適用性について検討を行った。なお、適用性の検討は、別途実施した三次元有限要素解析モデルと比較する形で行っている。

2. 解析対象の概要

図-1 には、本研究で解析対象とした橋脚の諸元を示している。本橋脚は、躯体が橋軸方向幅 3.6m、橋軸直角方向幅 10.0m、高さ 14.3m の小判型の鉄筋コンクリート製橋脚である。杭基礎は、全長 30m、直径 1,219.2mm、板厚 19mm（杭頭から 12.5m 下方位置で板厚が $t=14\text{mm}$ に変化）の鋼管杭基礎であり、計 38 本配置されている。但し、中間杭は一部で間引きされている。鋼管杭基礎は、橋軸方向幅 22.8m、橋軸直角方向幅 21.0m、高さ 4.0m の矩形型のフーチングに埋込み定着されている。

ここで、図中の地層構成は、本橋脚近傍で実施された既往の地質調査結果（ボーリング柱状図）をもとに設定している。また、本橋脚は 3 径間連続箱桁区間の固定支承を有する橋脚であることから、耐震設計上では、橋軸方向には 3 径間連続桁の全重量（ $W_u=51,180\text{kN}$ ）を、橋軸直角方向には当該支点における死荷重反力に相当する重量（ $W_u=18,200\text{kN}$ ）を負担する橋脚となっている。

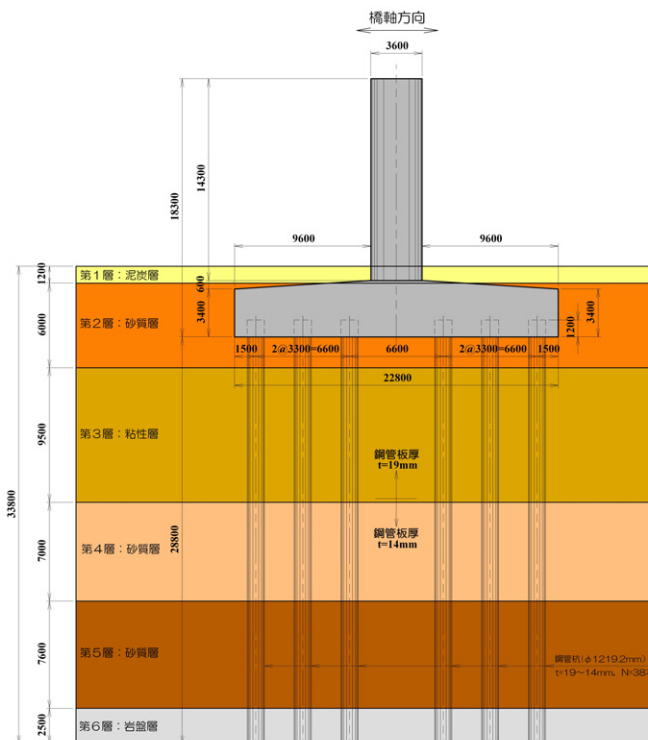


図-1 本研究で対象とした橋脚の諸元

3. 数値解析の概要

本数値解析では、橋脚—基礎—地盤系における骨組要素モデルの適用性を検証することを目的として、骨組要素モデルと三次元有限要素モデルによる固有値解析および地震応答解析を実施して両解析モデルの比較を行った。なお、本数値解析で骨組要素解析には MIDAS/Civil 2006、三次元有限要素解析には ABAQUS を使用した。

3.1 骨組要素モデル

図-2 には、骨組要素モデルを示している。本解析では、集中質量とせん断バネでモデル化した周辺地盤を、相互作用バネを用いて各杭体と連結させたモデルによって基礎—地盤系を表現した。適用した有限要素は、橋脚、フーチングおよび杭体は梁要素、地盤はフーチング幅の 5 倍の領域の質量およびせん断剛性を考慮したマス—バネ要素である。なお、杭体—地盤間、杭体—杭体間およびフーチング—地盤間の相互作用効果も考慮する必要があることから、それらも全てバネ要素を用いて連結させた。また、フーチング下端節点と各杭体の杭頭部節点お

よび橋脚天端から支承高の 1/2 の高さまでは剛体要素を用いて連結している．ここで、杭体一周辺地盤間およびフーチング一周辺地盤間のバネ剛性は、道路橋示方書Ⅳ【下部構造編】に基づいて下式の水平方向地盤反力係数 k_h により算定した．なお、杭体間のバネ剛性は各杭体が一体となって挙動するようにいずれも剛体連結した．

境界条件は、モデル底面（杭体下端）を完全固定とし、橋脚天端から支承高の 1/2 の高さにおける節点には上部構造分担質量を集中質量として考慮した．

$$k_h = k_{h0} \left(\frac{B_H}{0.3} \right)^{\frac{3}{4}} \quad (1)$$

$$k_0 = k_h * D * \Delta l \quad (2)$$

k_h ：水平方向地盤反力係数 (kN/m³)

k_{h0} ：水平方向地盤反力係数の基準値 (kN/m³)

B_H ：鋼管杭の換算載荷幅 (m)

k_0 ：解析モデルに与えるバネ剛性 (kN/m)

D ：基礎の載荷幅 (杭基礎の直径：m)

Δl ：バネ要素の鉛直方向間隔 (m)

3. 2 固体要素モデル

図-3 には、固体要素モデルを示している．固体要素解析でのモデル化の範囲は対称性を考慮した 1/2 モデルとし、周辺地盤はフーチング幅の 5 倍の領域をモデル化した．また、本解析では慣性力作用位置を適切に考慮するために、固定ピン支承と上部工を模擬した矩形断面要素を配置した．ここで、固定ピン支承は支承高 ($H = 560\text{mm}$) の 1/2 の高さにおいて回転を許容できるような剛な要素形状とし、上部工は実際の重心位置と質量が等価となるように要素高および質量密度を調整した．使用した有限要素は、橋脚、フーチングおよび周辺地盤には 8 節点固体要素、鋼管杭には 4 節点シェル要素であり、周辺地盤と鋼管杭間は簡略化して完全付着を仮定した．

境界条件は、モデル底面を完全固定とし、対称切断面はその面に対する法線方向変位成分を、周辺地盤の側面境界は鉛直方向変位成分のみを拘束している．

3. 3 材料物性値

表-1 には、周辺地盤の各地層部における材料物性値を示している．地盤の弾性係数（動的変形係数）は、道路橋示方書【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 V_s を評価して、地盤の動的変形係数 E_D を推定した．表-2 には、橋脚（柱、フーチング、上部工）および鋼管杭の材料物性値を示している．

表-1 周辺地盤の各地層における材料物性値

地層番号	弾性係数 E_D (MPa)	ポアソン比 ν_D	単位体積重量 W (kN/m ³)
第1層	23.5	0.49	12.0
第2層	53.7	0.49	17.0
第3層	90.6	0.49	14.0
第4層	92.2	0.49	17.0
第5層	235.1	0.49	19.0
第6層	317.6	0.40	20.0

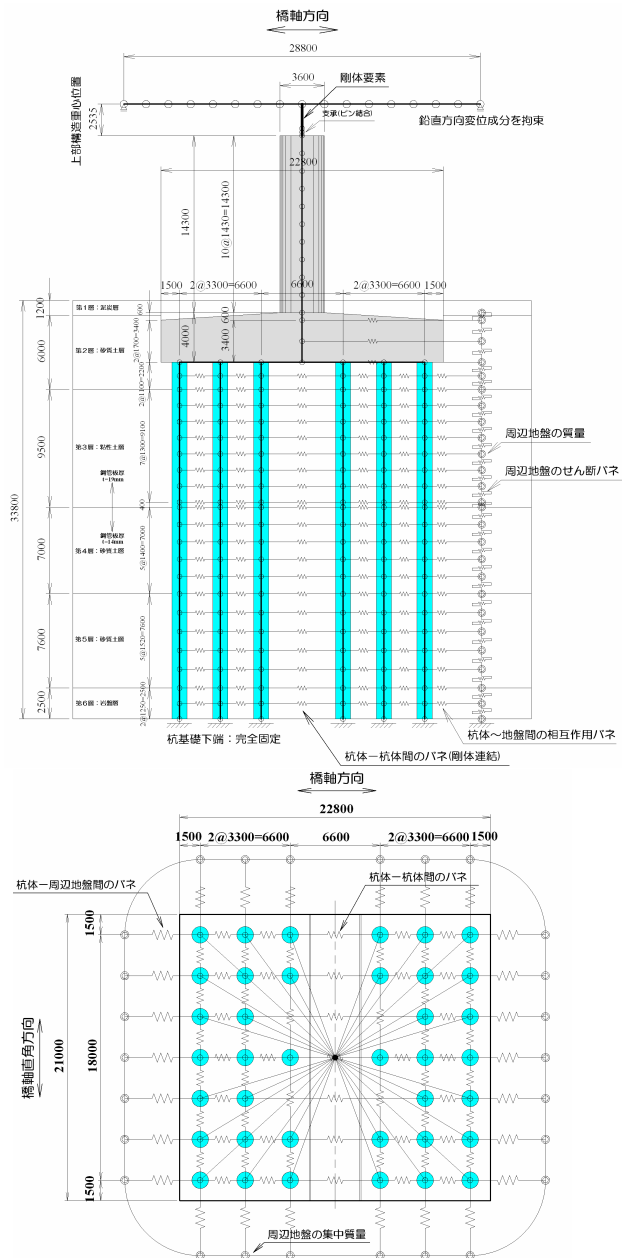


図-2 骨組要素モデル

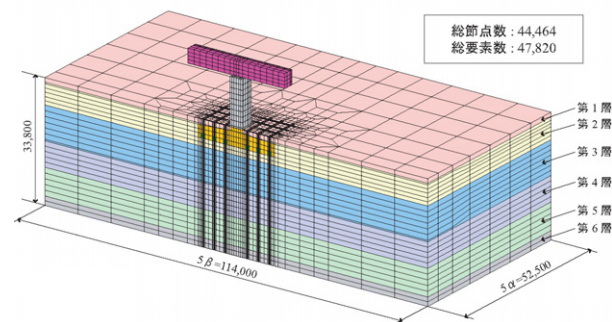


図-3 固体要素モデル

表-2 橋脚および鋼管杭の材料物性値

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

3. 4 地震応答解析法および入力地震動

地震応答解析は、いずれの解析モデルも線形時刻歴応答解析とした。骨組要素モデルには Newmark- β 法 ($\beta=1/4$) による直接積分法、固体要素モデルには固有振動モード 20 次モードまでを考慮したモーダルアナリシス法を適用し、時間刻みはいずれも 1/100 秒と設定した。粘性減衰は、骨組要素モデルは系の 1 次および 2 次の固有振動数に対して $\eta=5\%$ を与えた Rayleigh 型減衰とし、固体要素モデルは系の 1 次固有振動数に対して $\eta=5\%$ を与えた質量比例型減衰とした。これは、過去に実施した予備解析結果より、骨組要素モデルにおいて質量比例型減衰とした場合には、特に応答加速度に対して高周波数成分が卓越し易く、最大応答値を過大に評価する可能性があることが確認されたためである。従って、骨組要素モデルに対しては、低周波数領域に影響を与えない範囲で高周波数成分を除去する処理が必要であるものと判断して Rayleigh 型減衰を採用することとした。

図-4 には、地震応答解析に用いた入力地震波形（加速度波形）を示している。本解析では、2003 年十勝沖地震本震で観測された基盤面波形（十勝河口橋：A-2 橋台基盤面 GL-50m、橋軸方向成分）を用い、これを最大加速度 100gal に振幅調整して解析モデルの下端に入力した。ここで、実際に解析モデルに与えた波形は、観測波形に対して初期微動 P 波区間を除去した後の主要動 S 波区間の 30 秒間としている。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 0.2Hz~0.4Hz 付近の低周波数帯域が卓越しており、プレート境界型の地震動の特徴が確認できる。

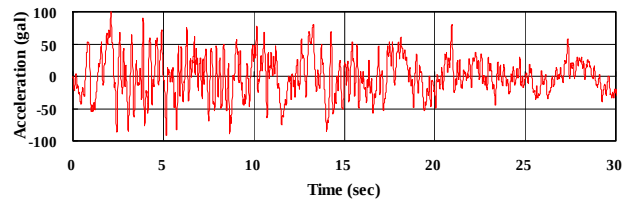


図-4 入力加速度波形【2003 年十勝沖地震：本震】

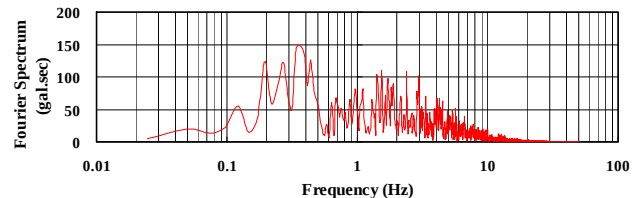


図-5 入力加速度波形のフーリエスペクトル

表-3 各解析モデルの第 1 次固有振動数の比較

方 向	骨組要素解析 A (Hz)	固体要素解析 B (Hz)	比 率 (A/B)
橋軸方向	1.220	1.230	0.99
直角方向	1.240	1.260	0.98

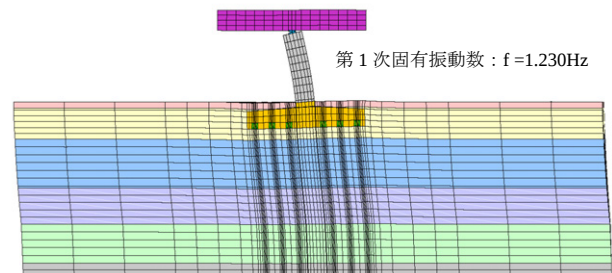


図-6 第 1 次固有振動モード（橋軸方向）

4. 数値解析結果の比較

4. 1 固有振動解析結果

表-3 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解析結果を、第 1 次固有振動数に着目して比較して示している。表より、橋軸方向、直角方向ともに骨組要素モデルは固体要素モデルと比較して 2.0% 程度と小さく評価されているが、両者は良く一致していることが分かる。図-6 には、固有振動モードの一例として、固体要素モデルにおける固有振動解析で得られた橋軸方向に関する第 1 次固有振動モードを示している。図より、第 1 次固有振動モードは、橋脚躯体の曲げ振動と周辺地盤のせん断振動が連成した振動モードになっていることが分かる。

4. 2 地震応答解析結果

本報では、紙面上の都合により、橋軸方向地震波入力時に関する地震応答解析結果に限定して示すものとする。

表-4、5 には、それぞれフーチング天端および橋脚天端における最大応答値を、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。表より、フーチング天端の最大応答値に関しては両者で良く一致していることが分かる。一方、橋脚天端の最大応答値に着目すると骨組要素モデルの応答値が固体要素モデルと比較して大きめに評価されていることが分かる。それは応答加速度で顕著であり 15% 程度大きく評価されている。しかしながら、応答速度および応答変位に関しては 4% 程度である。

表-4 フーチング天端における最大応答値の比較

項 目		骨組要素 モデル A	固体要素 モデル B
最大加速度	応答値(gal)	255.4	270.9
	比 率(A/B)	0.94	
最大速度	応答値(kine)	33.9	31.3
	比 率(A/B)	1.08	
最大変位	応答値(mm)	43.2	43.1
	比 率(A/B)	1.00	

表-5 橋脚天端における最大応答値の比較

項 目		骨組要素 モデル A	固体要素 モデル B
最大加速度	応答値(gal)	626.2	548.8
	比 率(A/B)	1.14	
最大速度	応答値(kine)	72.2	69.1
	比 率(A/B)	1.04	
最大変位	応答値(mm)	95.9	92.0
	比 率(A/B)	1.04	

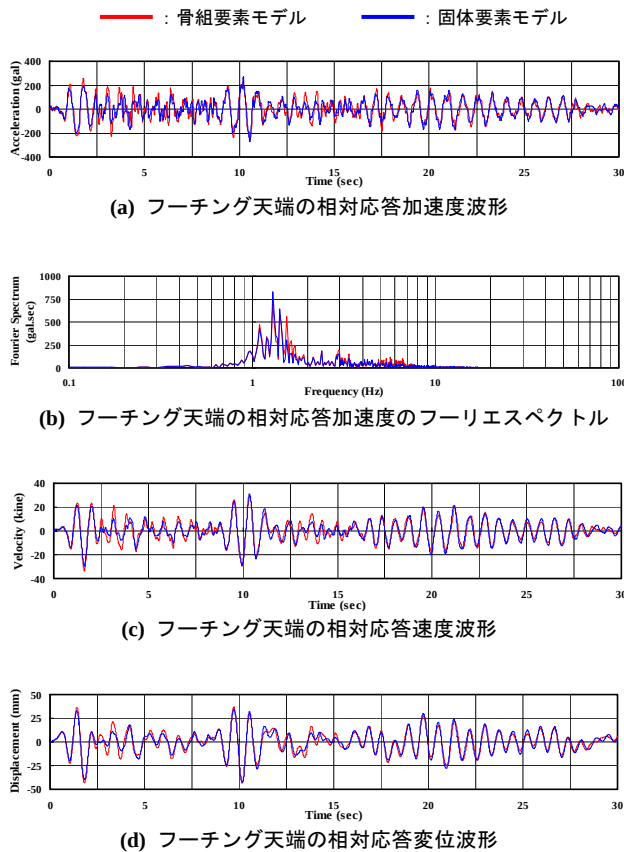


図-7 フーチング天端の各種応答波形に関する比較

図-7, 8 には、それぞれフーチング天端および橋脚天端位置における相対応答加速度波形、速度波形および変位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。まず、相対応答加速度波形について考察すると、フーチング天端、橋脚天端ともに応答波形の周期特性は両者で概ね一致していることが分かる。しかしながら、振幅レベルにおいては時刻 3sec および 14sec 前後において両者に差異が見られ、骨組要素モデルは固体要素モデルと比較して大きく評価されている。従って、加速度波形のフーリエスペクトルの振幅においても振動数 1.6Hz 近傍で骨組要素モデルが大きく評価されている。一方、相対応答速度波形および相対応答変位波形に着目すると、応答加速度波形で見られた時刻 3sec および 14sec 前後において見られた振幅レベルの差異は依然として見受けられるが、最大応答値は両解析モデルで良く一致しており、応答波形の周期特性に関しても概ね精度良く対応していることが分かる。

図-9 には、橋脚基部の軸方向応力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。図より、応力波形に関しても波形性状は他の応答波形と類似しており、最大応答値は骨組要素モデルが固体要素モデルと比較して若干大きく評価されていることが確認される。

以上より、提案する骨組要素を用いた一体解析モデルは、固体要素モデルと比較して若干大きめに評価される傾向にあるものの、応答性状や振幅レベルに関しては固体要素モデルを概ね再現可能であるものと判断される。

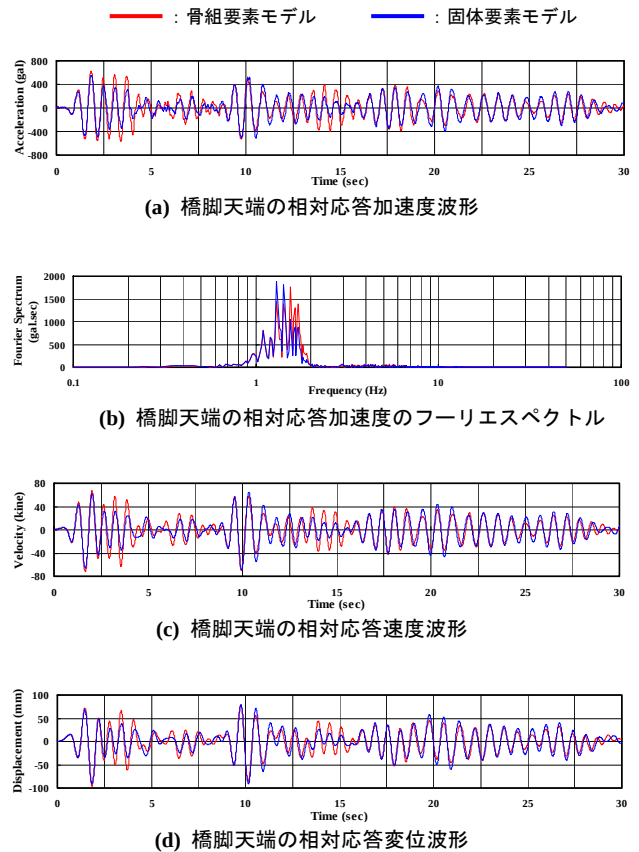


図-8 橋脚天端の各種応答波形に関する比較

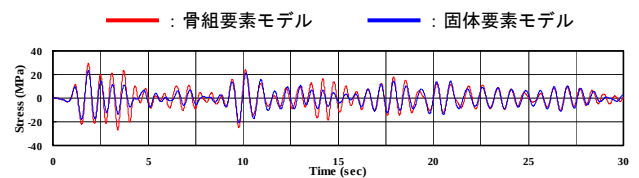


図-9 橋脚基部の軸方向応力波形に関する比較

5. 結 論

本研究では、相互作用効果を考慮した橋脚-基礎-地盤系モデルに対する骨組要素モデルの適用性を検証することを目的として、道路橋における一般的な群杭基礎を有する橋脚を対象とした検討を実施した。

検討の結果、橋脚および基礎構造を梁要素、周辺地盤を質点とせん断バネで表現し、基礎構造と周辺地盤を相互作用バネによって連結させた一体解析モデルを構築することで、三次元有限要素モデル（固体要素モデル）の解析結果を概ね再現可能であることが明らかとなった。

但し、本検討は線形解析に限定していることから、提案する骨組要素モデルの非線形領域における適用性については、今後さらに検討を行う必要がある。

本検討は、道路管理技術委員会（財団法人：北海道道路管理技術センター）に設置された「長大橋梁等の耐震性能評価検討部会」において審議された内容の一部である。関係委員からは多くの貴重なご意見を頂戴しました。ここに記して謝意を表します。