

# 周辺地盤を考慮した群杭基礎の地震応答解析法に関する一考察

*Earthquake response analysis for foundation with rectangular pile group considering ground motion*

株式会社ドーコン ○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)  
 土木研究所寒地土木研究所 正会員 石川 博之 (Hiroyuki ISHIKAWA)  
 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. 序 論

設計実務において一般に実施されている橋梁の地震応答解析は、その簡便さから基礎-地盤系の影響を単純化した集約パネとしてモデル化する場合が多い。(図-1)しかしながら、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、実際の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解析が必要となる。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有限要素モデルやパネ-質点系モデル(以下、骨組要素モデル)等が挙げられる。解析精度の観点からは有限要素モデルの適用が望ましいと考えられるが、解析規模の拡大に伴う解析所要時間や費用の観点からは、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る。従って、実務への適用性に配慮する場合には比較的簡易な骨組要素モデルによって評価可能な解析モデルの構築が望ましい。

このような観点から、本研究では道路橋の一般的な群杭基礎橋脚を対象として、集約パネモデルの精度を高め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(以下、固体要素解析モデル)と比較する形で行っている。

## 2. 解析対象の概要

本研究では、一般国道 336 号十勝河口橋側橋梁部の P-7 橋脚(3 径間連続 PC 箱桁, 固定支承)を解析対象とした。図-2 には解析対象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 のフーチング内に埋込み定着(定着長 1.2m)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)を下に設定している。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、橋軸直角方向には支点位置における死荷重反力相当の重量( $W_u=18,200\text{kN}$ )を負担する橋脚である。

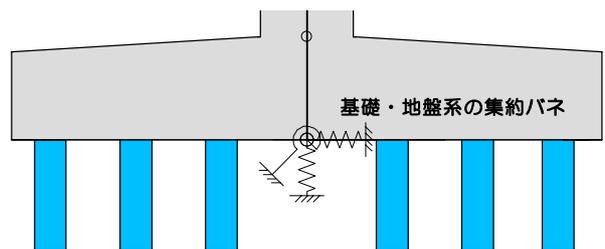


図-1 単純化した集約パネモデルの概念図

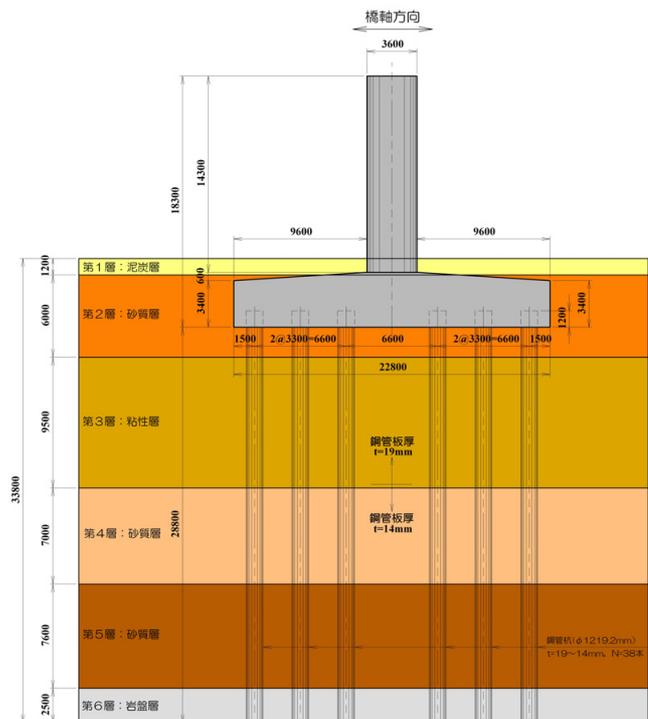


図-2 解析対象橋脚の諸元【側面図】

## 3. 数値解析の概要

本数値解析では、基礎-地盤系の地震応答特性評価を目的としていることから、橋脚躯体形状はモデル化せずフーチング上面までをモデル化した。なお、本数値解析で用いた動的応答解析プログラムは、骨組要素解析は MIDAS/Civil 2006, 固体要素解析は ABAQUS である。

### 3.1 骨組要素解析モデル

図-3 には骨組要素解析モデルの一例として、橋軸方向地震波入力時の解析モデルを示している。本解析では、集中質量としてモデル化した周辺地盤を、相互作用パネ

を用いて杭体と連結した Penzien 型モデルにより基礎—地盤系を表現した。適用した有限要素は、フーチングおよび鋼管杭は梁要素、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、フーチング下端の節点と各杭体の杭頭部節点は剛体要素を用いて連結している。ここで、杭体—周辺地盤間およびフーチング—周辺地盤間のバネ剛性は、道路橋示方書【下部構造編】に基づき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に連結している。

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

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

ここに、

$k_h$  : 水平方向地盤反力係数 (kN/m<sup>3</sup>)

$k_{h0}$  : 水平方向地盤反力係数の基準値 (kN/m<sup>3</sup>)

$B_H$  : 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)

$\Delta l$  : バネ要素の鉛直方向間隔 (m)

境界条件は、モデル底面 (杭体下端) を完全固定とし、また、橋軸方向地震波入力時には橋軸直角方向の並進方向成分および回転方向成分を、橋軸直角方向地震波入力時には橋軸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。なお、フーチング天端の節点には、上部構造分担質量と橋脚躯体質量を集中質量 (橋軸方向:  $m=6405.7t$ , 橋軸直角方向:  $m=3042.7t$ ) として考慮した。

### 3. 2 固体要素解析モデル

図-4には固体要素解析モデルの一例として、橋軸方向地震波入力時の解析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。使用した有限要素は、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、周辺地盤の側面は鉛直方向変位成分を拘束している。なお、フーチング天端には、骨組要素解析モデルと同様にシェル要素を用いて上部構造分担質量と橋脚躯体質量を考慮している。

### 3. 3 材料物性値

表-1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にはフーチングおよび鋼管杭の材料物性値を示している。

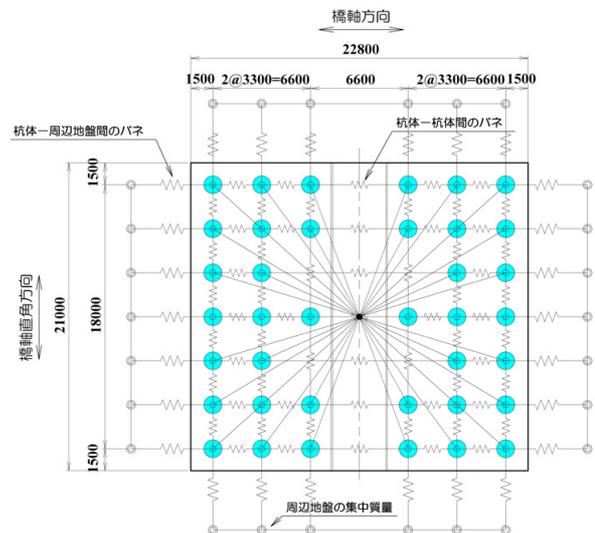
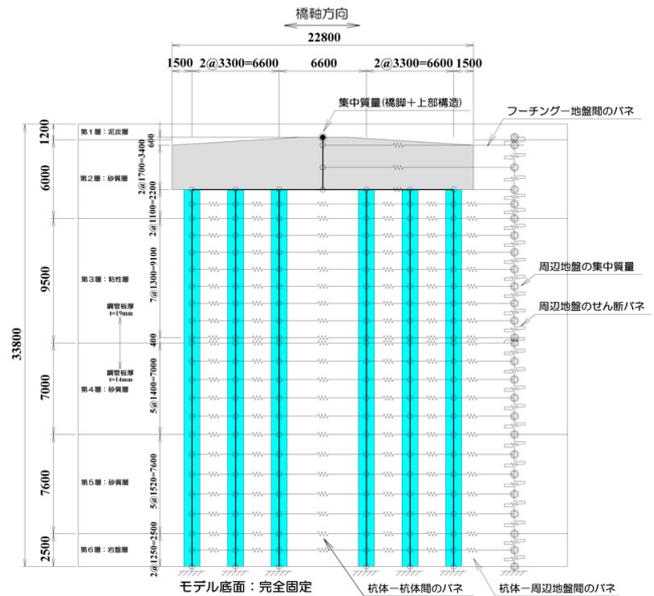


図-3 骨組要素解析モデルの一例【橋軸方向加振時】

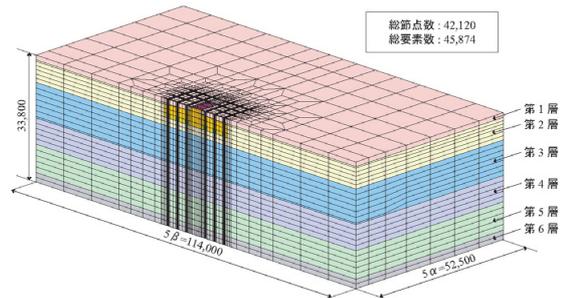


図-4 固体要素解析モデルの一例【橋軸方向加振時】

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 $E_D$ (N/mm <sup>2</sup> )	ポアソン比 $\nu_D$	単位体積重量 $W$ (KN/m <sup>3</sup> )
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

表-2 フーチング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 $\nu$	単位体積重量 W (kN/m <sup>3</sup> )
フーチング	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直接積分法による時刻歴応答解析（線形解析）とした。数値積分は、骨組要素モデルでは陰解法に基づいた Newmark- $\beta$  法 ( $\beta=1/4$ ) を用い、積分間隔を 1/100 秒と設定して実施している。一方、固体要素モデルには陽解法を適用し、積分間隔はクーランの条件を満たすように設定している。

また、粘性減衰モデルは、固体要素モデルの場合には系の 1 次固有振動数に対して  $h=5\%$  となる質量比例型減衰モデルを採用し、骨組要素モデルの場合には 1 次および 2 次の固有振動数に対して  $h=5\%$  となる Rayleigh 型減衰モデルを採用している。

図-5には本数値解析で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 に振幅調整して用いることとした。また、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-6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分かる。

4. 数値解析結果の比較

4. 1 固有値解析結果

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値解析結果を、最低次固有振動数に着目して示している。表より、橋軸方向、直角方向ともにモデルによる差は 2.0%程度と小さく、両者は良く一致している。

図-7には橋軸方向の最低次固有振動モード分布を各解析モデルで比較して示している。図より、最低次固有振動モードは、周辺地盤と杭体が一体となって水平方向に変形するモード分布を示している。また、各解析モデルにおける固有振動モード分布を比較すると、鉛直方向深度-10.0m 近傍で両者に若干の差異が見られるものの、その分布性状は良く一致しているものと判断される。

4. 2 地震応答解析結果

(1) フーチング天端における各種応答特性の比較

表-4, 5には、それぞれ橋軸方向地震波入力時および直角方向地震波入力時におけるフーチング天端の絶対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。また、図-8, 9には、同様に各入力方向に関する各種応答波形を両者で比較して示している。

1) 橋軸方向地震波入力時に関する比較

応答加速度に着目すると、最大応答加速度に関しては、骨組要素モデルが固体要素モデルと比較して 1.3 倍程度

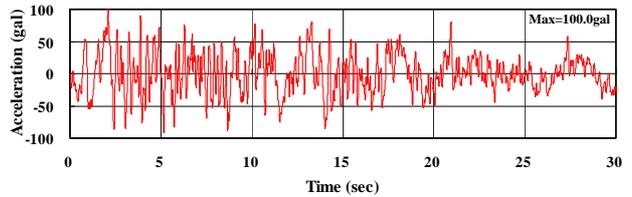


図-5 入力加速度波形【2003年十勝沖地震本震】

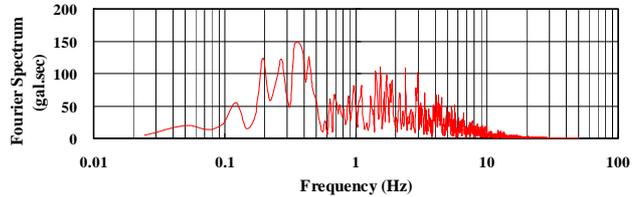


図-6 入力加速度波形のフーリエスペクトル

表-3 各解析モデルの最低次固有振動数

	骨組要素解析	固体要素解析	比率 (A/B)
	A (Hz)	B (Hz)	
橋軸方向	1.224	1.250	0.98
直角方向	1.284	1.260	1.02

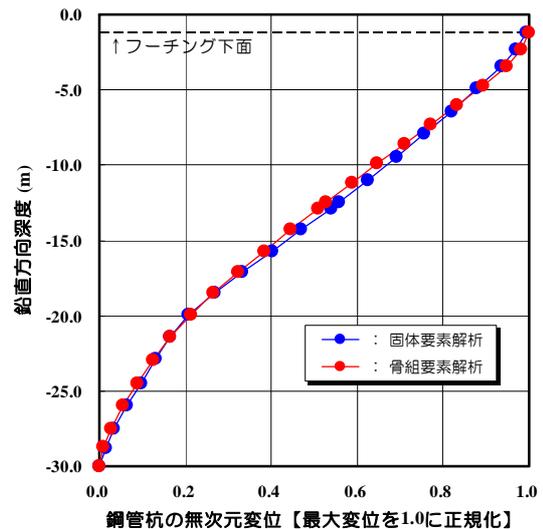


図-7 最低次振動モード分布の比較【橋軸方向】

大きく評価されている。応答波形に着目すると、一部で高次モードの影響による差異が見受けられるが、周期特性は両者でほぼ一致している。しかしながら、全体的には骨組要素モデルにおける応答が大きく評価される傾向にある。一方、応答速度および応答変位に関しては、最大応答値および応答波形性状ともに両者は比較的精度良く一致していることが分かる。

2) 直角方向地震波入力時に関する比較

応答加速度に着目すると、橋軸方向地震波入力時と同様に骨組要素モデルが大きく評価される傾向にあるものの、その程度は橋軸方向地震波入力時よりも小さく、応答波形、フーリエスペクトルともに両者は精度良く一致している。また、応答速度および応答変位に関しても、最大応答値および応答波形性状ともに良く一致している。

表-4 フーチング天端の最大応答値の比較【橋軸方向】

項目		骨組要素解析	固体要素解析
最大加速度	発生時刻(sec)	4.26	10.54
	応答値(gal)	347.02	258.43
最大速度	発生時刻(sec)	1.62	1.59
	応答値(kine)	32.87	32.45
最大変位	発生時刻(sec)	10.16	1.77
	応答値(mm)	39.36	39.10

表-5 フーチング天端の最大応答値の比較【直角方向】

項目		骨組要素解析	固体要素解析
最大加速度	発生時刻(sec)	3.26	10.52
	応答値(gal)	283.47	251.19
最大速度	発生時刻(sec)	1.58	1.58
	応答値(kine)	31.25	30.30
最大変位	発生時刻(sec)	1.75	1.76
	応答値(mm)	36.10	36.40

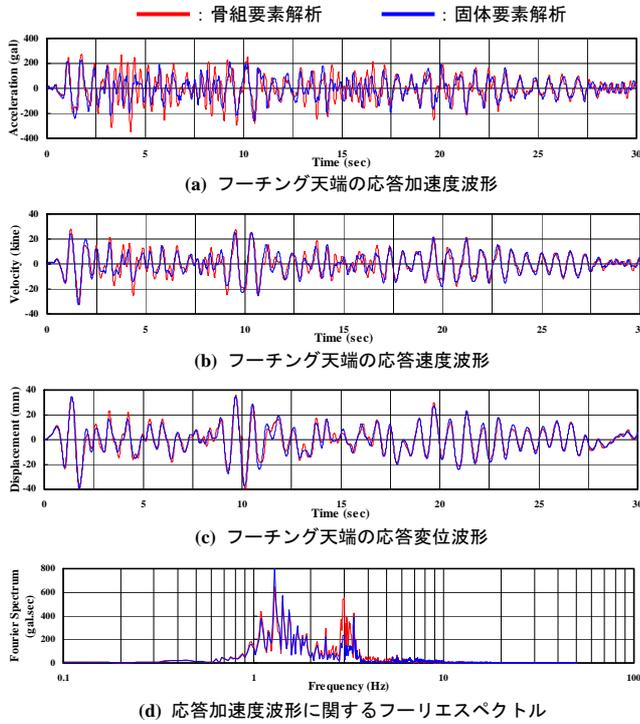


図-8 フーチング天端の応答波形に関する比較【橋軸方向】

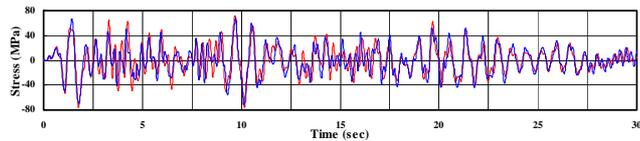


図-10 鋼管杭の軸方向応力波形に関する比較【橋軸方向】

なお、いずれの応答波形に関しても、橋軸方向地震波入力時は直角方向地震波入力時と比較して両者の整合が若干低い。これは橋軸方向地震波入力モデルでは直角方向地震波入力モデルと比較して上部構造分担質量が2倍程度大きいことから、2次振動モードが励起されやすいことによるものと推察される。しかしながら、固体要素モデルではその影響は小さく、いずれの地震波入力方向においても1次振動モードが卓越していることが分かる。

(2) 鋼管杭の軸方向応力度波形に関する比較

図-10, 11には、それぞれ各地震波入力方向における最外縁鋼管の杭頭部に関する軸方向(曲げ)応力度波形を各モデルで比較して示している。ここで、骨組要素モデルの応力度は両端節点の応力度を平均化して評価している。図より、橋軸方向および直角方向地震波入力

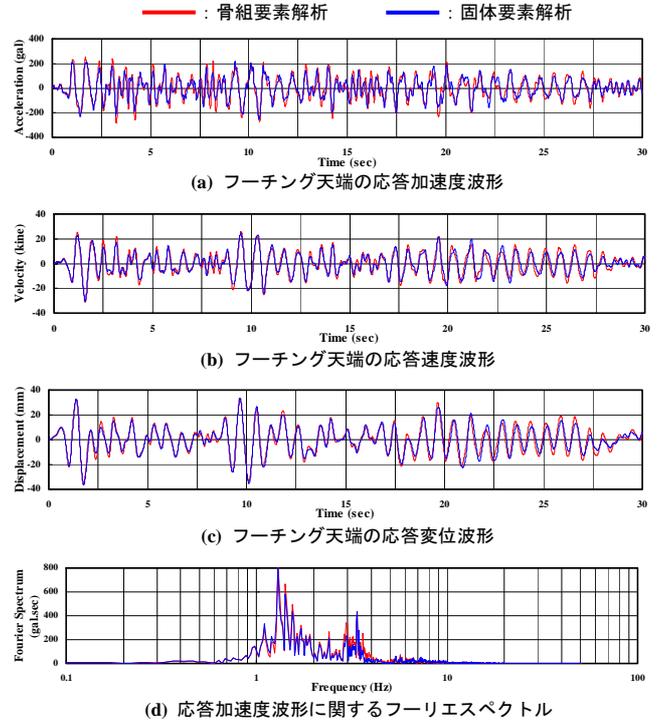


図-9 フーチング天端の応答波形に関する比較【直角方向】

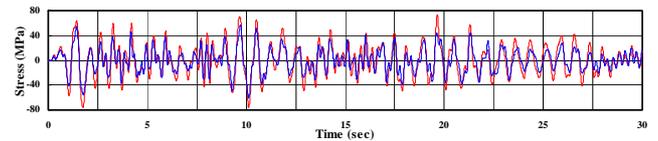


図-11 鋼管杭の軸方向応力波形に関する比較【直角方向】

時ともに発生応力度は骨組要素モデルが若干大きく評価されているものの、応答波形性状は良く一致している。なお、応力レベルは最大でも80MPa程度であり、いずれの場合においても降伏応力度には達していない。

5. 結論

本研究では、群杭基礎橋脚の基礎-地盤系を対象として、設計実務で一般的に用いられる集約バネモデルの精度を高めた骨組要素モデルの適用性について、別途実施した固体要素モデルと比較する形で検討を行った。

検討の結果、周辺地盤を多質点系せん断バネモデルで表現し、それを相互作用バネを用いて杭体と連結した骨組要素モデル(Penzien型モデル)を構築することで、固体要素モデルを用いた線形の地震応答解析結果を比較的精度良く再現可能であることが明らかとなった。