

異なる基礎形式を有する基礎—地盤系モデル の地震応答特性に関する一考察

西 弘明¹・岡田慎哉²・京田英宏³・高畑智考⁴・小林竜太⁵・岸 徳光⁶

¹正会員 工博（独）寒地土木研究所 寒地構造チーム（〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目1-34）

²正会員 工修（独）寒地土木研究所 寒地構造チーム（〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目1-34）

³正会員 工修（株）構研エンジニアリング 橋梁部（〒065-8510 札幌市東区北18条東17丁目1-1）

⁴正会員 （株）長大 札幌支店 技術部（〒060-0031 札幌市中央区北1条東2丁目5-3）

⁵正会員 工修（株）ドーコン 構造部（〒004-8585 札幌市厚別区厚別中央1条5丁目4-1）

⁶フェロー 工博 室蘭工業大学教授 工学部建設システム工学科（〒050-8585 室蘭市水元町27-1）

1. はじめに

実務設計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バネとしてモデル化する場合が多い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、実挙動を精度良く予測するためには基礎—地盤系の動的相互作用効果を考慮した連成解析が必要となる。

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^{2),3),4)}。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る。従って、実務での適用に配慮した場合には、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、基礎—地盤系モデルの動的相互作用効果を考慮した骨組要素モデルの適用性に関する基礎的な検討を実施した。ここで、本研究では、その適切なモデル化の手法に関する検討や妥当性の検証に資するための基礎データの収集を目的としていることから、3つの異なる基礎形式を検討対象とした。なお、骨組要素モデルの適用性検討は、別途実施した三次元有限要素解析（以下、固体要素モデル）と比較する形で行っている。

2. 解析対象とする基礎形式の概要

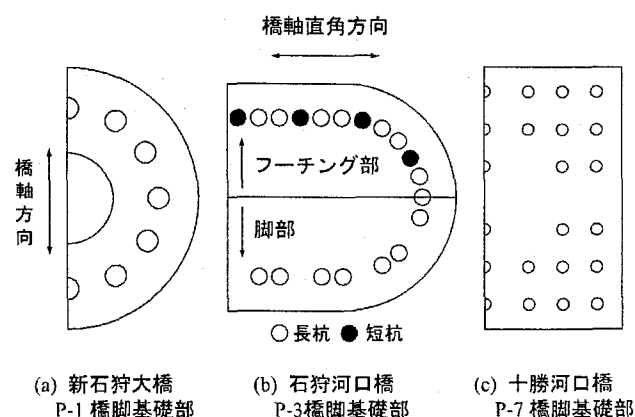
図—1には各基礎形式に関する概要を示している。

（1）新石狩大橋（P-1橋脚、鋼管杭の斜杭基礎）

新石狩大橋 P-1 橋脚の基礎構造は、全長 37.0m、直径 812.8mm、板厚 12.7mm（杭頭から 8.8m 下方の位置で板厚が $t=9.5\text{mm}$ に変化）の鋼管杭基礎が計 12 本配置された斜杭基礎である。鋼管杭は、フーチングに対して 12.5° の角度で放射状に配置されており、それらが直径 10.0m、高さ 2.3m の円盤型のフーチングに結合されている。

（2）石狩河口橋（P-3 橋脚、脚付き鋼管矢板基礎）

石狩河口橋 P-3 橋脚の基礎構造は、井筒部 12.5m、脚部 28.5m から成る全長 41.0m の脚付き鋼管矢板基礎である。井筒部には、板厚 16mm（杭頭から 10m、20m 下方の位置で板厚がそれぞれ $t=12.7\text{mm}$ 、 $t=9.5\text{mm}$ に変化）の長杭が 30 本、板厚 12.7mm の短杭が 16 本の計 46 本配置されている。なお、鋼管直径はいずれも 812.8mm であり、これらはいずれも橋軸方向幅 10.9m、橋軸直角方向幅 22.5m、高さ 2.5m の小判型のフーチングに結合されている。



図—1 各基礎形式の概要図（半断面図）

(3) 十勝河口橋 (P-7 橋脚, 鋼管杭の群杭基礎)

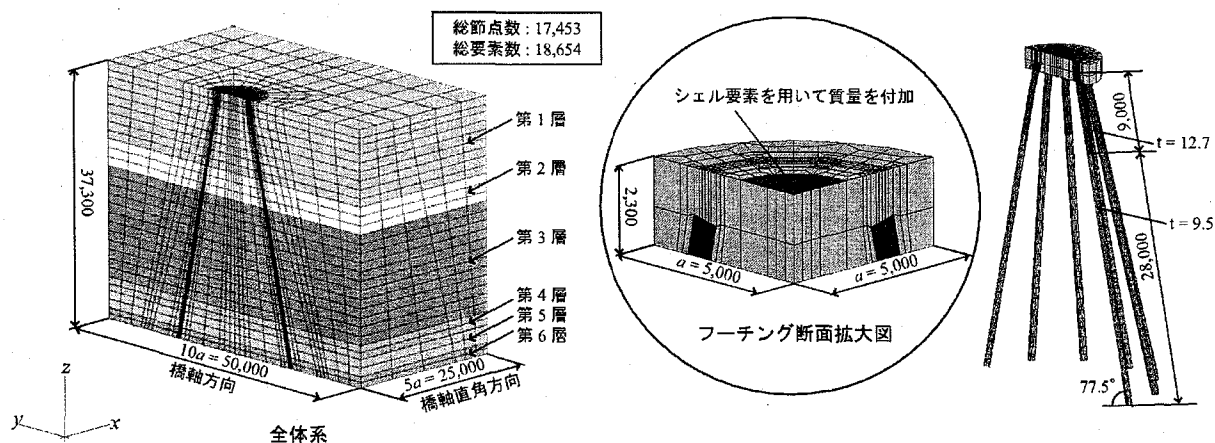
十勝河口橋 P-7 橋脚の基礎構造は、全長 30m、直径 1,219.2mm、板厚 19mm (杭頭から 12.5m 下方位置で板厚が $t=14\text{mm}$ に変化) の鋼管杭基礎が計 38 本配置された群杭基礎である。杭基礎は、橋軸方向幅 22.8m、橋軸直角方向幅 21.0m、高さ 4.0m の矩形型のフーチングに結合されている。

3. 数値解析の概要

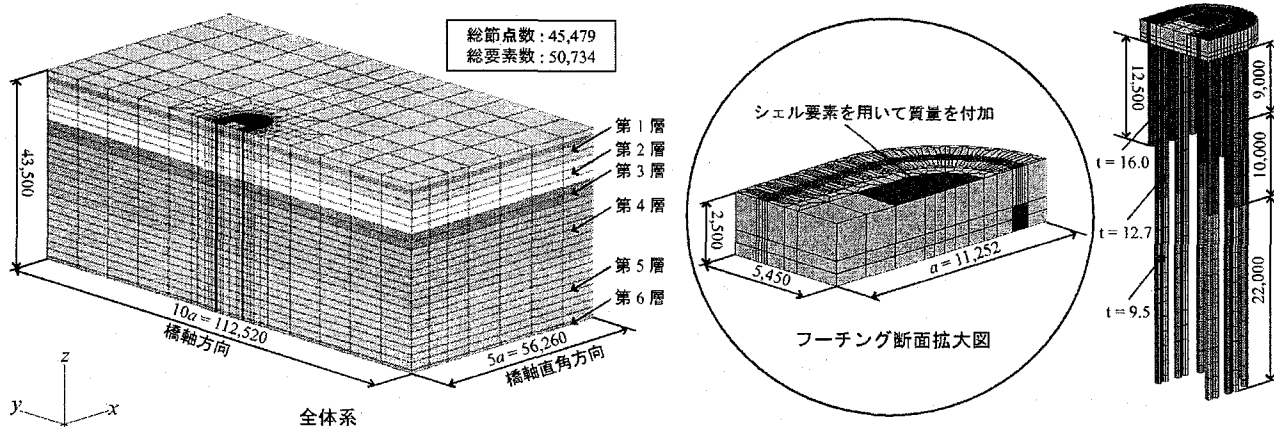
本数値解析では、基礎-地盤系モデルの地震応答特性評価を目的としていることから、橋脚躯体形状はモデル化せずフーチング上面までをモデル化した。

(1) 固体要素モデル

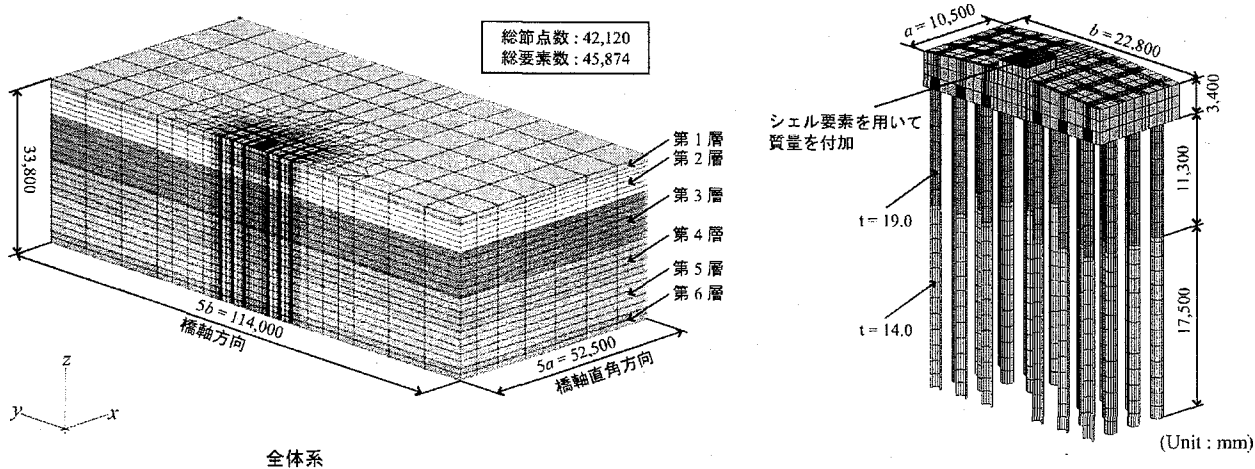
図-2 には固体要素モデルの一例として、各基礎



(a) 新石狩大橋 P-1 橋脚基礎部の三次元モデル



(b) 石狩河口橋 P-3 橋脚基礎部の三次元モデル



(c) 十勝河口橋 P-7 橋脚基礎部の三次元モデル

図-2 固体要素モデルの一例【橋軸方向地震波入力時】

形式に関する橋軸方向地震波入力時の解析モデルを示している。固体要素解析におけるモデル化の範囲は対称性を考慮した 1/2 モデルとし、周辺地盤にはフーチング幅の 5 倍の領域を考慮している。

使用した有限要素タイプは、フーチングおよび周辺地盤は 8 節点固体要素、鋼管は 4 節点シェル要素であり、周辺地盤と鋼管杭間はいずれも完全付着を仮定した。なお、石狩河口橋における鋼管矢板継手部は隣接する杭とシェル要素を用いて連結している。

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た。また、フーチング天端には、上部構造質量と橋脚躯体質量に相当する質量をシェル要素を用いて付加している。

(2) 骨組要素モデル

図-3には骨組要素モデルの一例として、各基礎形式に関する橋軸方向地震波入力時の解析モデルを示している。解析モデルは、いずれも基礎構造系（杭基礎本体あるいは矢板基礎本体）と周辺地盤系から構成されており、基礎構造は梁要素、周辺地盤は質点とせん断バネでモデル化し、それらを相互作用バネを用いて連結させた連成系モデルである。

周辺地盤には、固体要素モデルの場合と同様に、フーチング幅の5倍の領域における質量とせん断剛性を考慮し、各地層が一体となって挙動するように同一深度における質点はいずれも剛体連結させている。また、フーチング下端の節点と各杭体の杭頭部節点に関しても全て剛体連結するものとした。

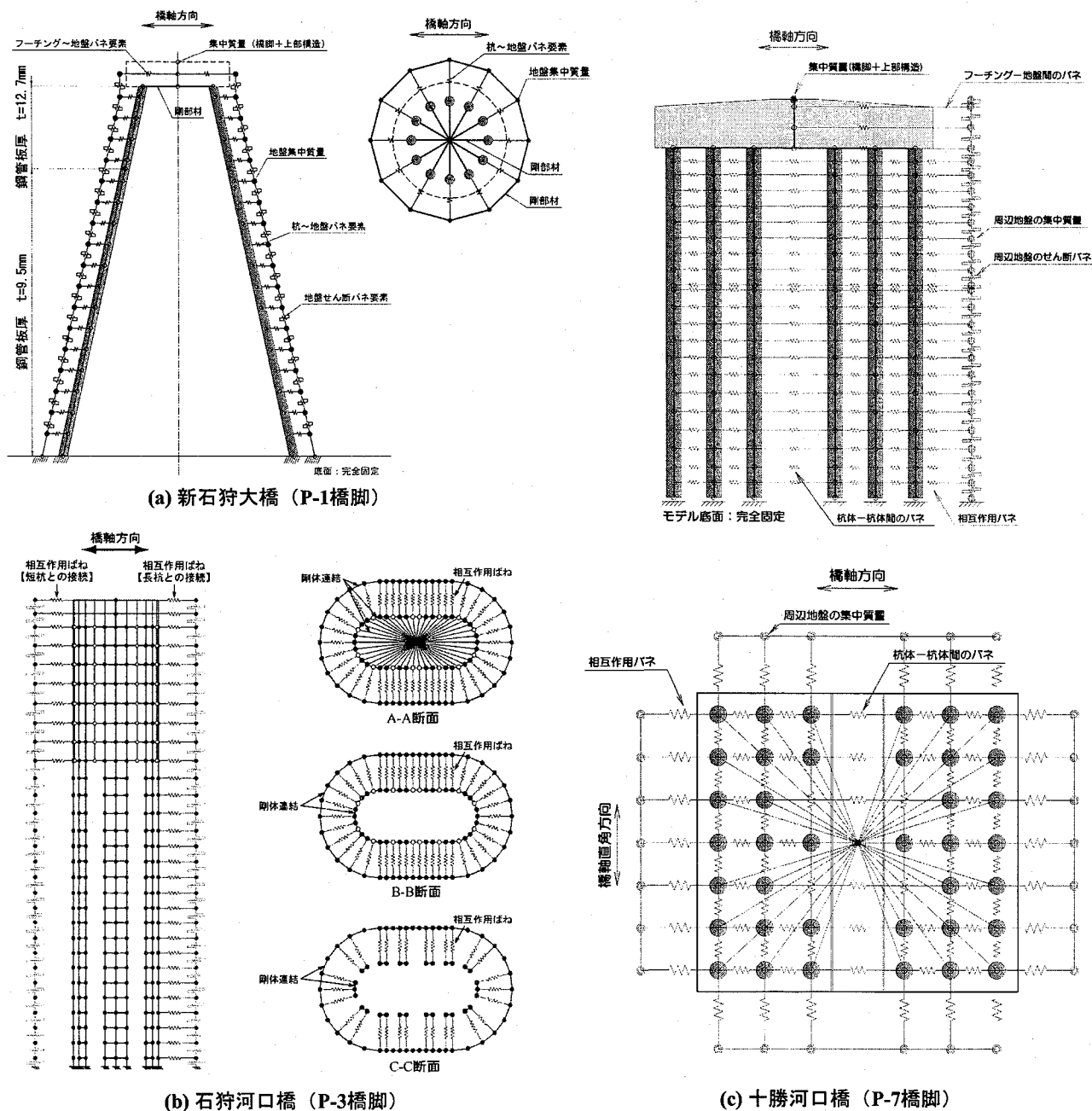


図-3 骨組要素モデルの一例【橋軸方向地震波入力時】

相互作用バネの剛性は、道路橋示方書・同解説Ⅳ【下部構造編】¹⁾に基づいて、杭基礎の水平方向地盤反力係数 k_H により評価するものとした。

境界条件は、モデル底面（杭下端および周辺地盤下端）を完全固定としている。また、フーチング天端の節点には、上部構造質量および橋脚躯体質量を集中質量として考慮している。

(3) 材料物性値

表－１にはフーチングおよび鋼管（矢板）の材料物性値を示している。表－２～４には当該地点における地質調査結果に基づいて設定した各橋梁の周辺地盤に関する各地層毎の物性値を示している。

(4) 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基づいた線形時刻歴応答解析とした。ここで、本解析では、骨組要素モデルにはMIDAS-Civil2006³⁾、固体要素モデルにはABAQUS⁶⁾を使用している。数値積分は、骨組要素モデルにはNewmark β 法（ $\beta=1/4$ ）を適用し、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Courant条件を満足するように決定されている。粘性減衰は、骨組要素モデルの場合には1次と2次の固有振動数に対して $h=5\%$ となるRayleigh型減衰とし、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を採用している。

図－４には本解析に用いた入力地震動（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ている。また、実際にモデルに与えた入力波形は、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の周波数帯が卓越していることが分かる。

4. 数値解析結果および考察

(1) 固有値解析結果

表－５には各解析モデルにおける固有値解析結果を最低次固有振動数に限定して示している。表より、橋軸方向、橋軸直角方向ともに解析モデルによる差は最大でも2%程度と小さく、骨組要素モデルと固体要素モデルは良く一致しているものと判断される。

表－１ フーチングおよび鋼管の材料物性値

部 材	弾性係数 E (MPa)	ポアソン比 ν	単位体積重量 ρ (kN/m ³)
フーチング	3.00E+04	0.20	24.5
鋼管(矢板)	2.00E+05	0.30	77.0

表－２ 周辺地盤の物性値【新石狩大橋】

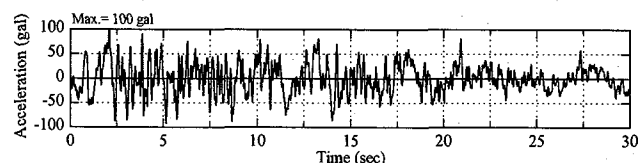
地層番号	弾性係数 E (MPa)	ポアソン比 ν	単位体積重量 ρ (kN/m ³)
第1層	73.1	0.493	19.1
第2層	254.5	0.487	19.0
第3層	203.9	0.491	16.7
第4層	254.5	0.487	19.0
第5層	303.3	0.488	17.4
第6層	898.1	0.477	19.1

表－３ 周辺地盤の物性値【石狩河口橋】

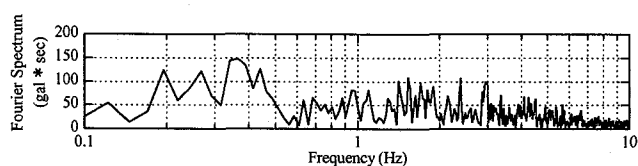
地層番号	弾性係数 E (MPa)	ポアソン比 ν	単位体積重量 ρ (kN/m ³)
第1層	195.8	0.490	18.2
第2層	239.6	0.493	18.2
第3層	112.5	0.489	16.8
第4層	262.0	0.479	18.3
第5層	270.8	0.480	17.3
第6層	990.2	0.473	20.0

表－４ 周辺地盤の物性値【十勝河口橋】

地層番号	弾性係数 E (MPa)	ポアソン比 ν	単位体積重量 ρ (kN/m ³)
第1層	23.5	0.490	12.0
第2層	53.7	0.490	17.0
第3層	90.6	0.490	14.0
第4層	92.2	0.490	17.0
第5層	235.1	0.490	19.0
第6層	317.6	0.400	20.0



図－４ 入力地震動【2003年十勝沖地震本震，基盤波形】

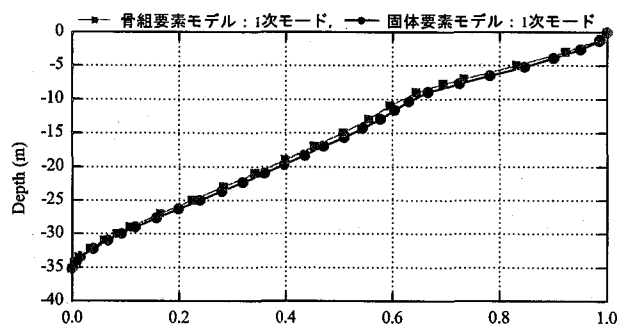


図－５ 入力加速度波形のフーリエスペクトル

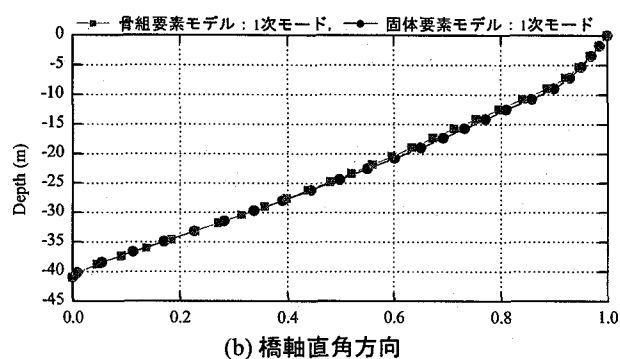
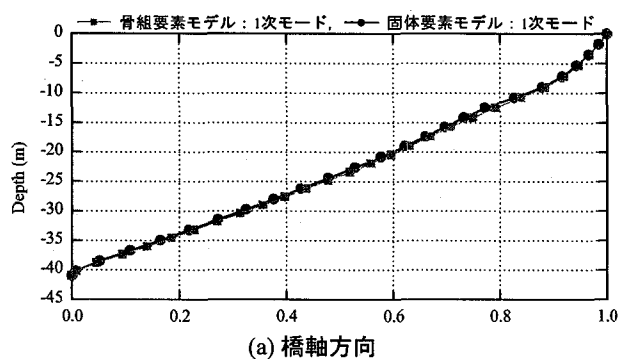
表－５ 各モデルに関する最低次固有振動数の比較

橋 梁 名	橋軸方向			橋軸直角方向		
	骨組要素モデル A (Hz)	固体要素モデル B (Hz)	比 率 (A/B)	骨組要素モデル C (Hz)	固体要素モデル D (Hz)	比 率 (C/D)
新石狩大橋	1.290	1.300	0.99	—	—	—
石狩河口橋	1.250	1.250	1.00	1.250	1.260	0.99
十勝河口橋	1.224	1.250	0.98	1.284	1.260	1.02

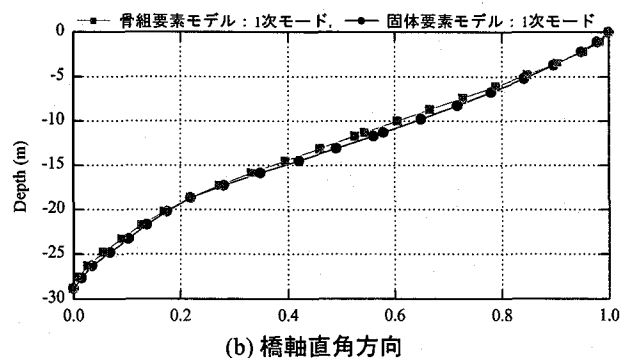
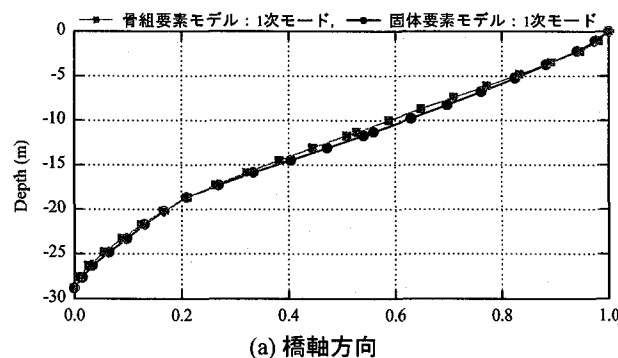
※新石狩大橋は、対称構造かつ上部構造質量も各方向で同一であることから解析方向は1方向とする。



図－６ 最低次固有振動モードの比較【新石狩大橋】



図－７ 最低次固有振動モードの比較【石狩河口橋】



図－８ 最低次固有振動モードの比較【十勝河口橋】

図－６～８には各橋梁の最低次固有振動モードを各解析モデルで比較して示している。図より、解析方向および解析モデルに関わらず、振動モード形状は周辺地盤のせん断変形を呈しており、地盤の水平

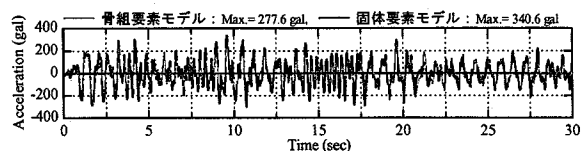
変位による影響が支配的であることが分かる。また、各モデルにおける固有振動モード形状を比較すると、一部で両者に若干の差異が見られるものの、その分布性状は概ね良く一致しているものと判断される。

(2) 地震応答解析結果

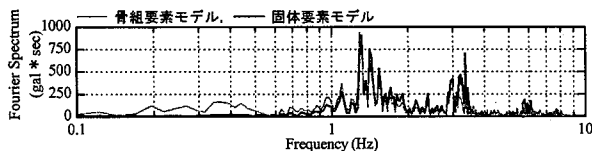
(a) フーチング天端における各種応答波形の比較

図-9～11には、各基礎形式に関する相対加速度、相対速度および相対変位に関する各種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。ここでは、紙面上の都合により、フーチングの天端節点に関する応答波形にのみ着目している。また、応答加速度波形に関しては、そのフーリエスペクトルも併せて示している。

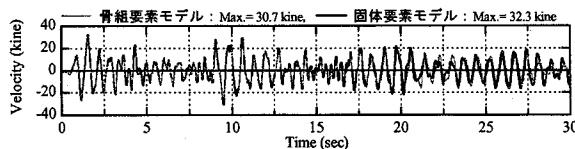
図-9（新石狩大橋、鋼管杭の斜杭基礎）より、応答加速度波形に着目すると、最大加速度は固体要素モデルで340.6gal（発生時刻 $t=9.61$ 秒），骨組要素モデルで277.6gal（発生時刻 $t=9.66$ 秒）であり、骨組要素モデルによる応答値が19%程度小さく評価されている。これは、骨組要素モデルでは3Hz近傍におけるフーリエスペクトルの振幅が固体要素モデルと比較して小さく評価されていることに起因するものと考えられる。しかしながら、応答波形性状に関しては両者で良く一致している。一方、応答速度波形に着目すると、最大速度は固体要素モデルで32.3kine（発生時刻 $t=1.58$ 秒），骨組要素モデルで30.7kine（発生時刻 $t=1.59$ 秒）であり、応答波形性状



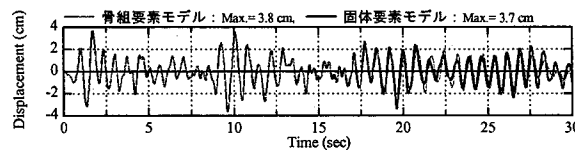
(a) 応答加速度波形



(b) 応答加速度波形のフーリエスペクトル

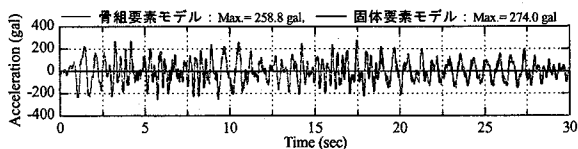


(c) 応答速度波形

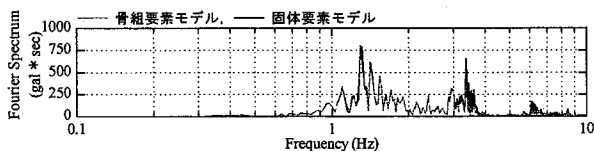


(d) 応答変位波形

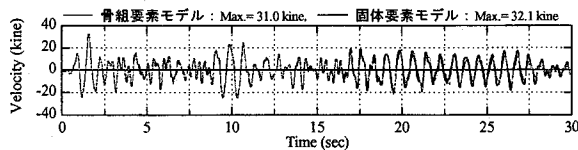
図-9 フーチング天端の応答波形の比較【新石狩大橋】



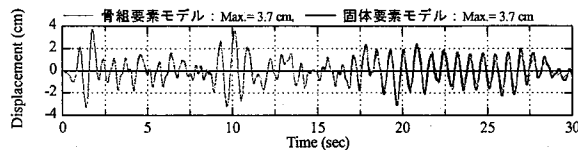
(a) 応答加速度波形



(b) 応答加速度波形のフーリエスペクトル

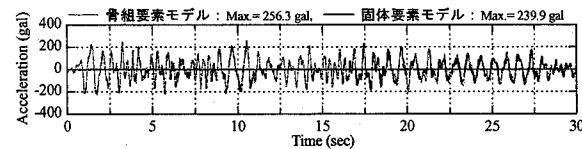


(c) 応答速度波形

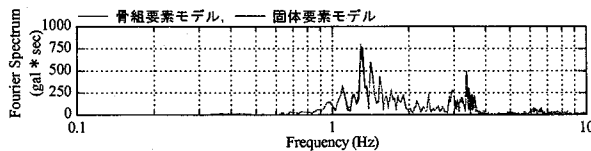


(d) 応答変位波形

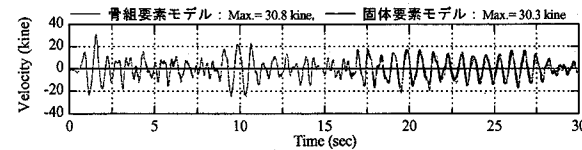
(1) 橋軸方向地震波入力時



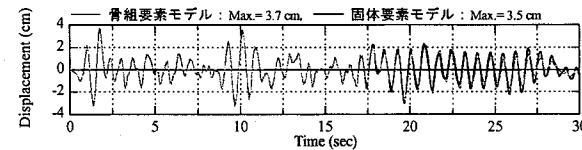
(a) 応答加速度波形



(b) 応答加速度波形のフーリエスペクトル



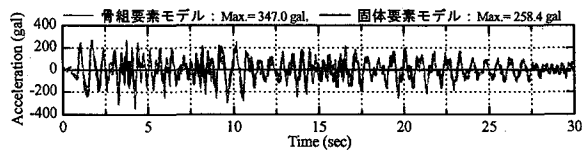
(c) 応答速度波形



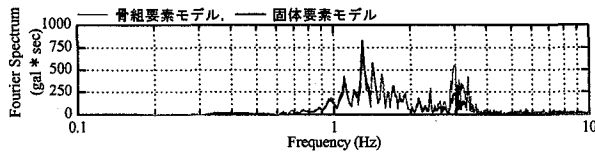
(d) 応答変位波形

(2) 直角方向地震波入力時

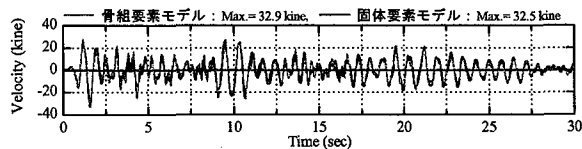
図-10 フーチング天端の応答波形の比較【石狩河口橋】



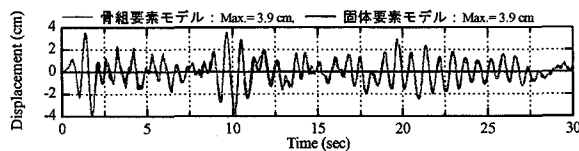
(a) 応答加速度波形



(b) 応答加速度波形のフーリエスペクトル

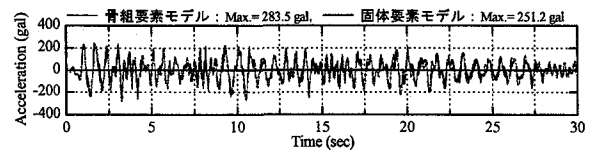


(c) 応答速度波形

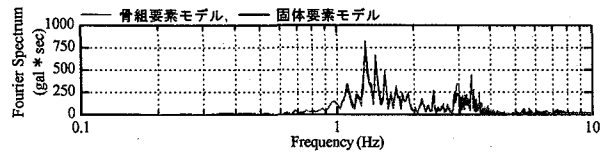


(d) 応答変位波形

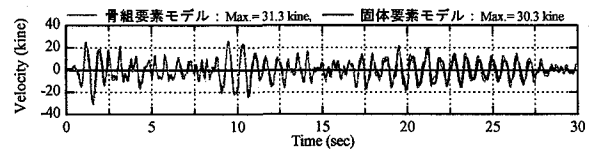
(a) 橋軸方向地震波入力時



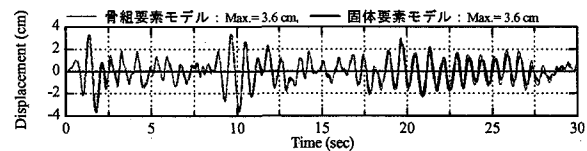
(a) 応答加速度波形



(b) 応答加速度波形のフーリエスペクトル



(c) 応答速度波形



(d) 応答変位波形

(b) 直角方向地震波入力時

図-11 フーチング天端の応答波形の比較【十勝河口橋】

とともに両者は良く一致していることが分かる。

また、応答変位波形は、最大変位は固体要素モデルで3.7cm（発生時刻 $t=1.73$ 秒）、骨組要素モデルで3.8cm（発生時刻 $t=1.75$ 秒）であり、応答速度波形と同様に最大応答値、応答波形性状ともに両者は精度良く一致している。これより、応答加速度波形に関しては両者で差異が見られるが、応答速度および応答変位波形に関しては、骨組要素モデルと固体要素モデルは比較的精度良く一致していることが分かる。

図-10（石狩河口橋、脚付き鋼管矢板基礎）より、応答加速度に着目すると、橋軸方向地震波入力時の最大加速度は固体要素モデルで274.0gal（発生時刻 $t=17.47$ 秒）、骨組要素モデルで258.8gal（発生時刻 $t=10.53$ 秒）、一方、直角方向地震波入力時には、それぞれ239.9gal（発生時刻 $t=10.54$ 秒）、256.3gal（発生時刻 $t=10.53$ 秒）と、その差は5～6%であり両者は概ね良く一致している。応答波形に関しては、橋軸方向地震波入力時において全体的に骨組要素モデルが若干大きく評価される傾向にあるが、これは3Hz近傍のフーリエスペクトルの振幅が固体要素モデルと比較して小さいためと推察される。しかしながら、応答波形性状に関しては両者で良く一致しているものと判断される。

一方、応答速度および応答変位に関しては、いずれの地震波入力方向においても、最大応答速度は30kine程度、最大応答変位は3.7cm程度であり、最大応答値および応答波形性状ともに両者は良く一致しているものと判断される。

図-11（十勝河口橋、鋼管杭の群杭基礎）より、応答加速度波形に着目すると、橋軸方向地震波入力時の最大加速度は固体要素モデルで258.4gal（発生時刻 $t=10.54$ 秒）、骨組要素モデルで347.0gal（発生時刻 $t=4.26$ 秒）であり、骨組要素モデルによる応答値が26%程度大きく評価されている。また、直角方向地震波入力時においても、それぞれ251.2gal（発生時刻 $t=10.52$ 秒）、283.5gal（発生時刻 $t=3.26$ 秒）と橋軸方向地震波入力時と比較してその程度は小さいものの骨組要素モデルが大きく評価されている。応答波形性状に関しては、周期特性は概ね一致しているが、全体的に骨組要素モデル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、他の基礎形式と同様に、最大応答値および応答波形性状ともに両者は概ね良く一致している。

また、いずれの応答波形においても、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性が低い。これは橋軸方向における上部構造

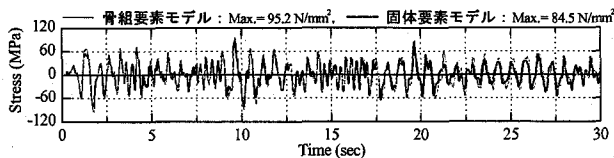
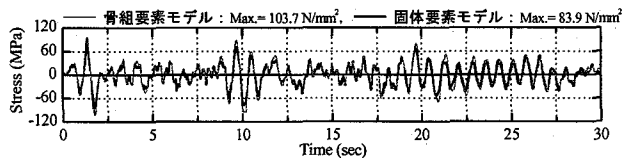
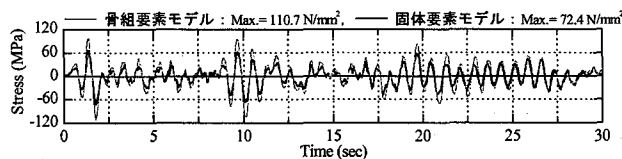


図-1 2 鋼管の軸方向応力波形の比較【新石狩大橋】

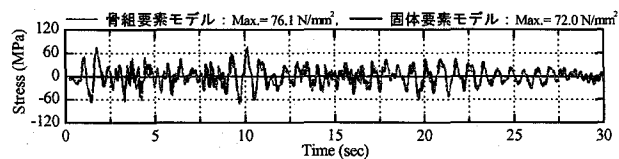


(a) 橋軸方向地震波入力時

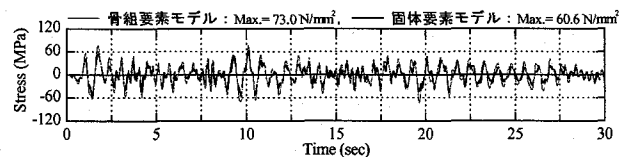


(b) 直角方向地震波入力時

図-1 3 鋼管の軸方向応力波形の比較【石狩河口橋】



(a) 橋軸方向地震波入力時



(b) 直角方向地震波入力時

図-1 4 鋼管の軸方向応力波形の比較【十勝河口橋】

質量（分担質量）が直角方向のそれと比較して2倍程度大きいことから（橋軸方向：6405.7t，直角方向：3042.7t），フーリエスペクトルからも推察されるように2次振動モードの影響を受けていることに起因するものと考えられる。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。

以上より，いずれの基礎構造形式においても，応答加速度波形やそのフーリエスペクトルに関しては両者で若干の差異が見られるものの，応答速度および応答変位波形に関しては比較的精度良く一致することが明らかとなった。

(b) 鋼管杭の軸方向応力波形に関する比較

図-1 2～1 4には，各基礎形式に関する鋼管杭の軸方向（曲げ）応力度波形を骨組要素モデルと骨組要素モデルで比較して示している。ここで，着目した要素は杭体に最大曲げ応力が発生する部位とし，

新石狩大橋（斜杭基礎）および十勝河口橋（群杭基礎）は杭頭部の要素，石狩河口橋（脚付き鋼管矢板基礎）は杭下端の要素に着目している。

図より，いずれの基礎形式および地震波入力方向においても骨組要素モデルは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分かる。しかしながら，その差は最大でも30%程度であり，応答波形性状に関しても両者は良く一致していることから，本解析モデルは杭体の発生応力度に関しても比較的精度良く再現可能であるものと判断される。

また，いずれの基礎形式においても，本解析における入力地震動に対しては降伏応力度には至っていないことが確認された。

5. まとめ

本研究では，基礎－地盤系を対象として，実務設計で一般的に用いられてい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検証を行った。適用性検討は，3つの異なる基礎形式を対象として，別途実施した三次元有限要素解析（固体要素モデル）結果と比較する形で行った。

検討の結果，基礎構造を梁要素，周辺地盤を多質点系せん断バネで表現し，それらを相互作用バネを用いて連結させた連成系モデルを構築することで，三次元有限要素解析の線形地震応答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。

今後は，非線形応答の検証を実施するとともに，橋脚躯体や上部構造を含めた橋梁全体系（基礎－地盤－構造物系）モデルに対する検証も実施する予定である。

謝辞：本研究を行うにあたり，室蘭工業大学大学院建設システム工学専攻，構造力学研究室の吉澤佳展君には多大なる御支援を頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅳ【下部構造物編】，Ⅴ【耐震設計編】，2002.3.
- 2) 土木学会：橋の動的耐震設計，2003.3.
- 3) 森 伸一郎：杭基礎構造物に対する質点ばね系モデルの提案とその実被害への適用，土木学会応用力学論文集，Vol.3，pp.609-620，2002.8.
- 4) 森，三浦，張，岸下，岩上，砂坂：杭基礎構造物の一斉地震応答解析，土木学会構造工学論文集，Vol.48A，pp.457-468，2002.3.
- 5) MIDAS Civil 2006 Manual, Ver.701, 2006.
- 6) ABAQUS Analysis User's Manual, Ver.6.6, 2006.