

周辺地盤の影響を考慮した鋼管矢板基礎の振動特性について

Vibration characteristics of steel pipe sheet piles foundation considering ground motion.

(株) 構研エンジニアリング
(株) 構研エンジニアリング
(株) 構研エンジニアリング
(独) 土木研究所寒地土木研究所
(独) 土木研究所寒地土木研究所
室蘭工業大学

○正 員
正 員
正 員
正 員
正 員
フェロー

京田 英宏 (Hidehiro Kyoda)
伊藤 雄二 (Yuji Ito)
蝦名 成聡 (Naruaki Ebina)
西 弘明 (Hiroaki Nishi)
佐藤 京 (Takashi Sato)
岸 徳光 (Norimitsu Kishi)

1. はじめに

道路橋示方書・同解説Ⅴ耐震設計編¹⁾では、動的解析に基づき上下部構造の耐震性能の照査を行う場合、基礎および地盤を集約ばねとしてモデル化して良いとされている。集約ばねモデルは、設計に用いるには簡便で扱い易いものの、基礎および地盤の応答を合理的に評価できないため、一般的な構造諸元および地盤条件への適用が通例である。周辺地盤の影響を考慮する場合には、有限要素モデルの適用が望ましいが、解析規模などの理由から実務設計への適用は現実的ではない。また、実務への適用性を考慮したモデルとして、基礎をはり要素、地盤を質点とせん断ばねでモデル化し、基礎と地盤を相互作用ばねで連結する骨組モデル^{3),4)}が考えられるが、一般的な実務設計への適用例は多くない。

以上の観点から、本研究では、橋梁基礎として初めて鋼管矢板基礎が採用された一般国道231号石狩河口橋の主橋梁部の基礎―地盤系を対象として、三次元骨組モデルおよび三次元有限要素モデルによる固有値解析ならびに動的応答解析を実施し、骨組モデルの適用性について検討を行った。

2. 解析対象

一般国道231号石狩河口橋は、石狩川河口から約5.5km上流に位置する橋長1,412.7mの長大橋梁である。本研究では、石狩河口橋の主橋梁部である三径間連続鋼斜張橋の橋脚基礎とその周辺地盤を解析対象としている。支承条件は、橋軸方向に対して解析対象基礎が支持する橋脚における一点固定である。支点反力は11,300kN、橋脚の自重は14,300kNである。

図-1には解析対象基礎の構造諸元、表-1には鋼管矢板の断面性能を示している。基礎形式は、井筒部12.5m、脚部28.5mからなる全長41.0mの脚付き型鋼管矢板基礎である。平面形状は、隔壁を有しない小判型である。井筒部は長杭30本、短杭16本の合計46本からなり、脚部は長杭30本、中打ち杭は9本である。外周矢板および中打ち杭の外径は何れもφ812.8mmである。

3. 解析概要

本解析では、鋼管矢板基礎の基礎―地盤系における骨組モデルの適用性の確認を目的として、三次元骨組モデルおよび三次元有限要素モデルによる固有値解析ならび

に線形動的応答解析を実施し比較を行った。なお、骨組解析にはMIDAS/Civil2006、有限要素解析にはABAQUSを使用している。また、本解析においては、解析モデルが煩雑になることを避けるため、何れの解析モデルにおいても中打ち杭は考慮していない。

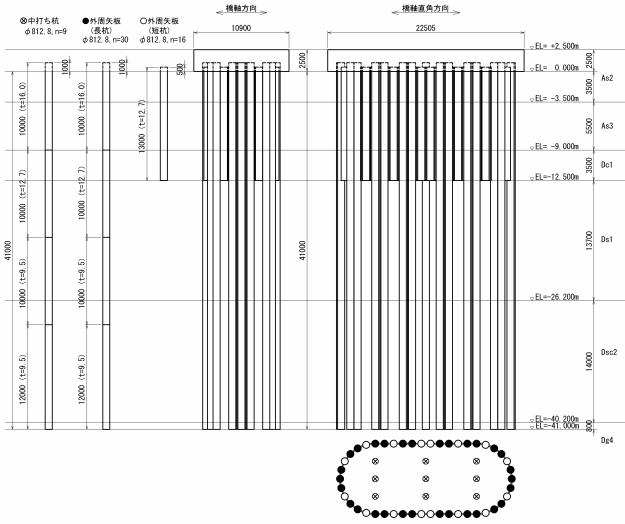


図-1 解析対象基礎

表-1 鋼管矢板 断面性能

部材	外径 D (mm)	厚さ t (mm)	断面積 A (mm ²)	断面2次モーメント I (mm ⁴)
鋼 管	812.8	16.0	40050	3180000000
	812.8	12.7	31920	2555000000
	812.8	9.5	23970	1934000000

表-2 材料物性値

部材	単位体積重量 ρ (kN/m ³)	ポアソン比 ν	弾性係数 E (N/mm ²)
底版 (RC)	24.5	—	—
鋼管矢板	77	0.30	2.0×105

表-3 地盤 動的物性値

土層	土質	単位体積重量 ρ (kN/m ³)	S波速度 Vs (m/s)	ポアソン比 ν	弾性係数 E (N/mm ²)	せん断弾性係数 G (N/mm ²)
As2	砂質土	18.2	190	0.490	195800	65700
As3	砂質土	18.2	210	0.493	239600	80300
Dc1	粘性土	16.8	150	0.489	112500	37800
Ds1	砂質土	18.3	220	0.479	262000	88600
Dsc2	粘性土	17.3	230	0.480	270800	91500
Dg4	砂質土	20.0	410	0.473	990200	336200

3.1 解析モデル

(1) 三次元骨組モデル

図-2 には、三次元骨組モデルの要素分割状況を示している。本解析モデルは、基礎構造および周辺地盤から構成されており、基礎構造ははり要素、周辺地盤は質点とせん断ばねでモデル化し、はり要素と質点を相互作用ばねにより連結した連成モデルである。底版部は剛要素を用いてモデル化している。鋼管矢板の継手部については、隣接する杭と剛体連結することにより考慮している。周辺地盤領域は、橋軸直角方向底版幅の5倍（112.52m×112.52m）とし、この地盤領域を外周矢板本数で等分割し各杭に分担させている。なお、地盤が層として一体で挙動するように、同一深さの質点は剛体連結している。また、相互作用ばねのばね定数には、道路橋示方書^{1),2)}に基づいて杭の水平方向地盤反力係数を用いている。

境界条件は、杭下端および周辺地盤下端を完全固定としている。また、解析対象基礎が支持している上部構造および橋脚の質量は、底版上面に集中質量として与えている。

(2) 三次元有限要素モデル

図-3 には、三次元有限要素モデル（橋軸方向地震波入力時）の要素分割状況を示している。本解析モデルは、対称性を考慮した1/2モデルとし、杭には4節点シェル要素を、底版部および地盤には8節点固体要素を用いている。鋼管矢板の継手部は、隣接する杭とシェル要素で接合することによりモデル化している。また、周辺地盤領域は、骨組モデルと同様に橋軸直角方向底版幅の5倍に設定している。

境界条件は、杭下端および周辺地盤下面を完全固定、対称面を対称条件とし、その他の面は鉛直方向変位を拘束している。また、解析対象基礎が支持している上部構造および橋脚の質量は、底版上面にシェル要素を設けて付加している。

3.2 材料物性値

表-2 には、底版および鋼管矢板の材料物性値を示している。表-3 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地盤の動的物性値を示している。支持層であるDg4層はS波速度410m/sであり、工学的基盤面と判断できる。

3.3 入力地震動

図-4 には、動的応答解析に用いた入力地震動とそのフーリエスペクトルを示している。入力地震動は、2003年十勝沖地震の際に一般国道336号十勝河口橋の基盤で観測された加速度波形の最大加速度を100galに振幅調整したものである。また、解析時間の短縮を目的として、主要動到達以前の波形を考慮していない。したがって、動的応答解析には図に示している主要動30秒間のみを用いている。フーリエスペクトルより、本地震波形は0.2~0.4Hzの周波数帯が卓越していることが分かる。

3.4 解析条件

骨組モデルおよび有限要素モデルに対して、それぞれ橋軸方向および橋軸直角方向に対する固有値解析ならびに動的応答解析を実施している。

動的応答解析は直接積分法による線形時刻歴応答解析とした。ここで、骨組モデルについては、Newmark β 法により、 $\beta=1/4$ 、積分間隔1/100秒に設定して実施している。減衰はRayleigh型とし、1次と2次の固有振動数に対して $h=5.0\%$ を与えている。地震動は骨組モデル下端に入力している。一方、有限要素モデルについては、陽解法を適用し、積分間隔はCourant条件を満足させるように決定されている。減衰は質量比例型とし、1次の固有振動数に対して $h=5.0\%$ を与えている。地震動は有限要素モデル下端に入力している。

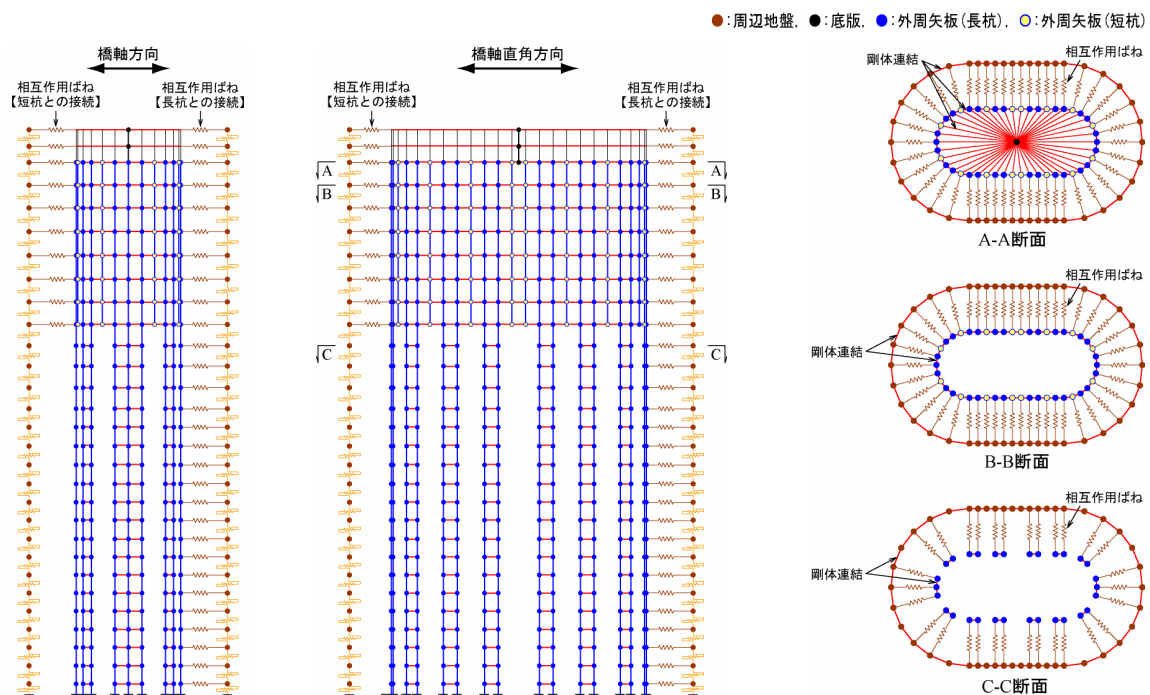


図-2 骨組モデル

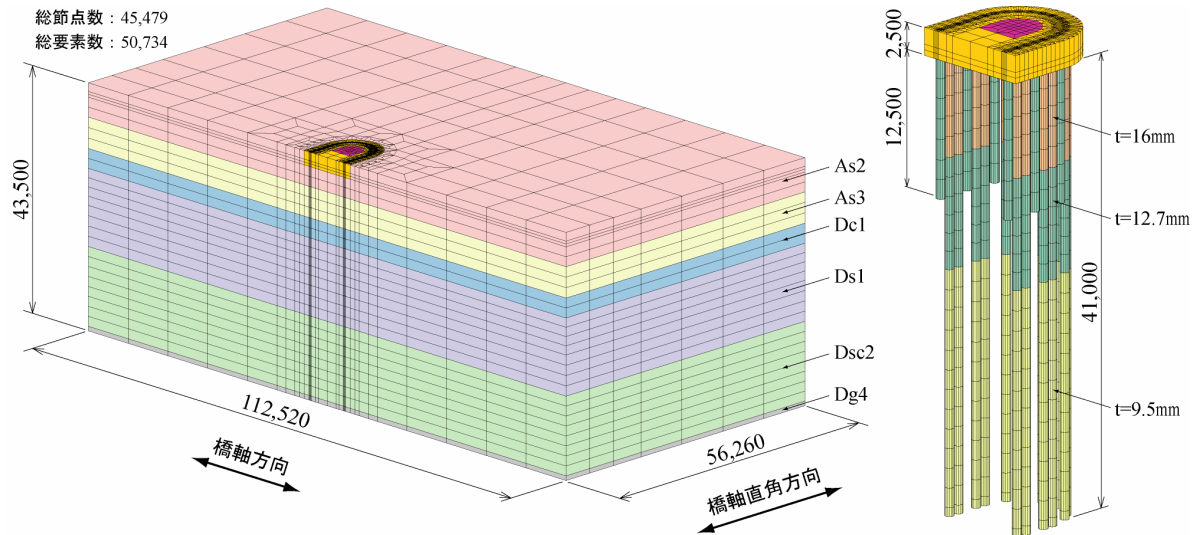
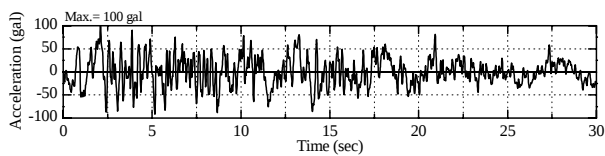
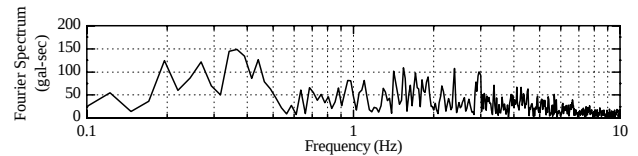


図-3 有限要素モデル（橋軸方向地震動入力時）



(a) 入力地震動

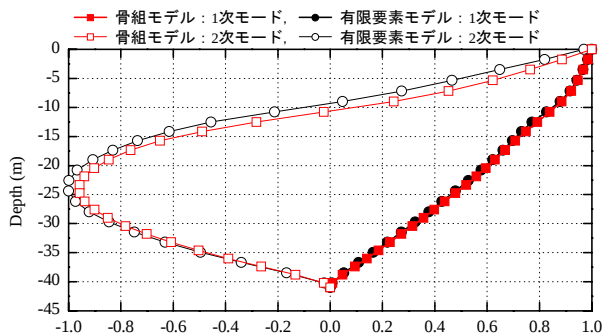


(b) 入力地震動のフーリエスペクトル

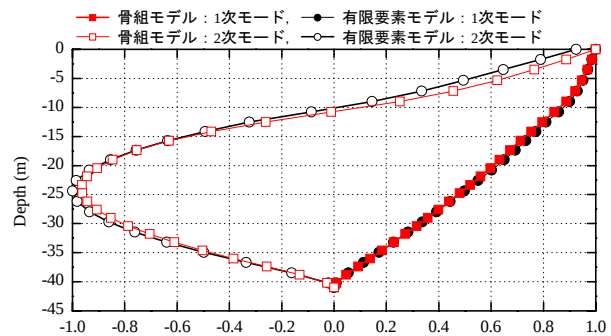
図-4 入力地震動

表-4 固有振動数

モード次数	振動数 (Hz)			
	橋軸方向		橋軸直角方向	
	骨組モデル	有限要素モデル	骨組モデル	有限要素モデル
1	1.25	1.25	1.25	1.26
2	3.44	3.44	3.45	3.45



(a) 橋軸方向



(b) 橋軸直角方向

図-5 固有振動モード

4. 解析結果

4.1 固有値解析

(1) 固有振動数

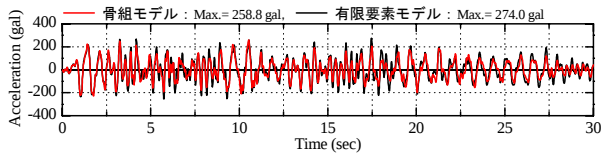
表-4 には、骨組モデルおよび有限要素モデルの 1 次および 2 次の固有振動数を示している。橋軸方向および橋軸直角方向の何れにおいても、解析モデルによる差は見られず、良く一致していることが分かる。

(2) 固有振動モード

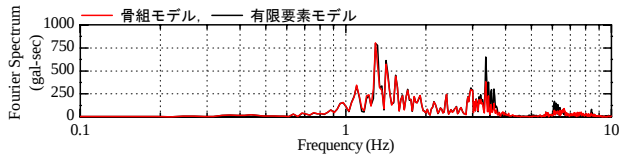
図-5 には、1 次および 2 次の固有振動モードについて、骨組モデルと有限要素モデルを比較して示している。

モード形状は、解析方向および解析モデルによらず地盤のせん断変形モード分布を呈しており、地盤変位による影響が支配的であることを示唆している。また、地盤の強度の急激な変化点である深度-9.0m の土層境界 (As3-Dc1) で角折れが確認できる。

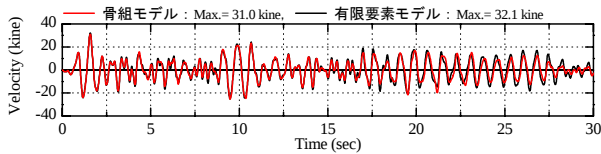
なお、1 次モードについては、骨組モデルと有限要素モデルは良く一致している一方、2 次モードについては、骨組モデルでは深度 0.0m にピークがあるのに対し有限要素モデルでは深度-25.0m 付近にあり、解析モデルによる差異が確認できる。



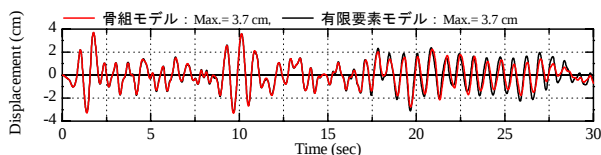
(a) 底版上面 応答加速度波形



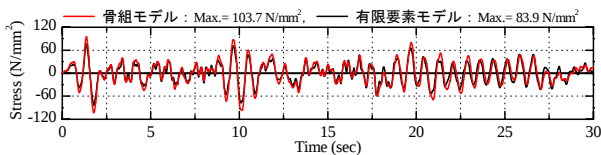
(b) 底版上面 応答加速度波形のフーリエスペクトル



(c) 底版上面 応答速度波形

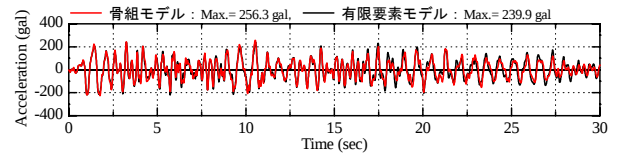


(d) 底版上面 応答変位波形

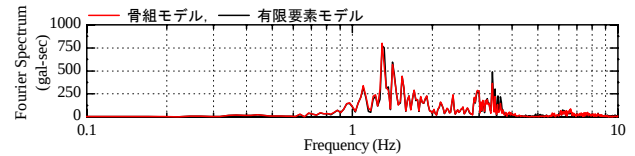


(e) 杭下端 軸方向応力波形

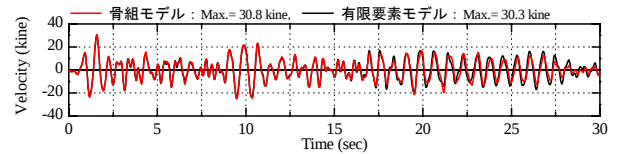
図-6 橋軸方向地震動入力時 応答波形



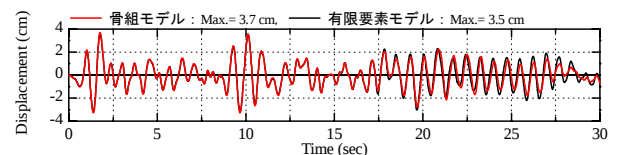
(a) 底版上面 応答加速度波形



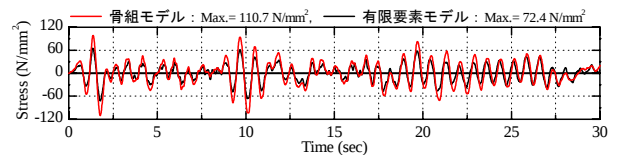
(b) 底版上面 応答加速度波形のフーリエスペクトル



(c) 底版上面 応答速度波形



(d) 底版上面 応答変位波形



(e) 杭下端 軸方向応力波形

図-7 橋軸直角方向地震動入力時 応答波形

4.2 動的応答解析

図-6 および図-7 には、それぞれ橋軸方向および橋軸直角方向地震動入力時の底版上面における応答波形について、骨組モデルおよび有限要素モデルを比較して示している。ここで、軸方向応力波形は杭体に最大応力が発生する杭下端の要素から抽出している。

まず、応答加速度波形について考察する。応答性状は何れの解析方向においても概ね一致しているものの、その振幅レベルには差異が見られる。また、そのフーリエスペクトルについても、3.0~4.0Hzの周波数帯で差異が見られる。なお、応答速度および応答変位波形については、何れの解析方向においても、その応答性状ならびに振幅レベルが大略一致していることが分かる。

次に、杭体に最大応力が発生する杭下端要素の軸方向応力波形について考察する。骨組モデルでは有限要素モデルに比して最大振幅が若干大きいものの、その応答性状については良く一致している。また、変位応答に対しても良く対応していることが確認できる。

5. まとめ

本研究では、鋼管矢板基礎の基礎-地盤系を対象として、三次元骨組モデルおよび三次元有限要素モデルによる固有値解析ならびに動的応答解析を実施し、骨組モデルの適用性について検討を行った。本研究により、基礎構造をはり要素、周辺地盤を質点とせん断ばねでモデル化し、基礎と地盤を相互作用ばねで連結する骨組モデルにより、有限要素モデルによる動的応答解析を概ね再現可能であることが明らかになった。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説V 耐震設計編，2002.3.
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説IV 下部構造編，2002.3.
- 3) 土木学会：橋の動的耐震設計，2003.3.
- 4) 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，応用力学論文集，Vol.3，pp.609-620，2000.8.