

周辺地盤の影響を考慮した橋脚の振動特性について

Vibration characteristics of bridge pier 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
(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 京田 英宏 (Hidehiro Kyoda)
正 員 伊藤 雄二 (Yuji Ito)
正 員 西 弘明 (Hiroaki Nishi)
正 員 佐藤 京 (Takashi Sato)
フェロー 岸 徳光 (Norimitsu Kishi)

1. はじめに

道路橋示方書・同解説^{1),2)}では、動的解析に基づき橋梁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で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、実用性を考慮した解析モデルとして、橋脚および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^{3),4),5)}も考えられるが、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、橋脚－基礎－地盤系を対象として、三次元骨組モデルと三次元有限要素モデルによる固有値解析ならびに線形時刻歴応答解析を実施し、周辺地盤の影響を考慮した橋梁構造物の時刻歴応答解析に対する骨組モデルの適用性について検討を行った。

2. 解析対象

本研究では、脚付き型鋼管矢板基礎に支持されたRCラーメン橋脚とその周辺地盤を解析対象とした。橋脚の支点反力は11,300kNである。

図-1には解析対象である橋脚－基礎－地盤系の概要図を示している。また、表-1には鋼管矢板の断面性能を、表-2には周辺地盤の地質条件を示している。橋脚形式は耐震壁を有するRCラーメン橋脚である。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本である。鋼管矢板の外径は何れもφ812.8mmである。また、地盤の耐震設計上の地盤種別²⁾はⅢ種である。

3. 解析概要

本解析では、橋脚－基礎－地盤系に対す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時刻歴応答解析を実施し比較を行った。ここで、骨組解析にはMIDAS/Civil2006、有限要素解析にはABAQUSを使用している。

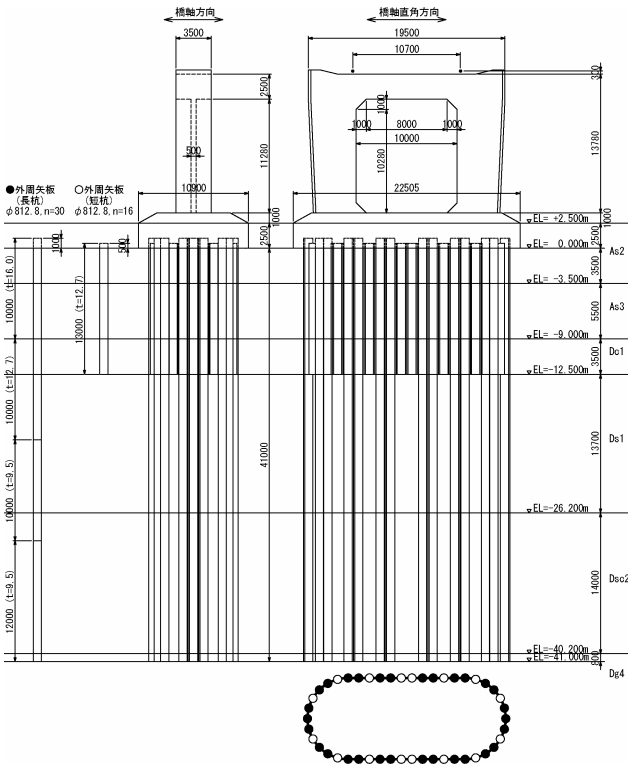


図-1 解析対象 概要図

表-1 鋼管矢板 断面性能

部材	外径 D (mm)	厚さ t (mm)	断面積 A (cm ²)	断面 2 次 モーメント I (cm ⁴)
鋼管	812.8	16.0	400.5	318000
	812.8	12.7	319.2	255500
	812.8	9.5	239.7	193400

表-2 地質条件

土層	土質	層厚 (m)	平均 N 値	単位重量 ρ (kN/m ³)
As2	砂	6.0	15	18.2
As3	細砂	5.5	16	18.2
Dc1	シルト	3.5	6	16.8
Ds1	シルト質砂	13.7	11	18.3
Dsc2	砂質シルト	14.0	16	17.3
Dg4	砂礫	14.1	50	20.0

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。解析モデルは、橋脚、基礎および周辺地盤から構成されており、橋脚、底版および杭をはり要素、周辺地盤を質点と水平2方向のせん断ばねによりモデル化し、杭と周辺地盤とを水平2方向の相互作用ばねで連結している。底版には剛体要素を使用している。鋼管矢板の継手部については、隣接する杭を水平2方向、鉛直1方向、計3方向のばね要素で連結することによりモデル化している。周辺地盤の対象範囲は橋軸直角方向底版幅の5倍（112.52m×112.52m）とし、この領域を外周矢板本数で等分割のうえ、各杭に分担させている。なお、周辺地盤の各土層がせん断層として挙動するように、同一深度の質点間を剛体連結している。また、相互作用ばねのばね定数については、道路橋示方書・同解説^{1),2)}に基づき、杭の水平方向地盤反力係数を使用している。

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、橋脚が支持している上部構造の質量は、橋脚天端の各支承位置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の要素分割状況を示している。解析モデルは骨組モデル同様、橋脚、基礎および周辺地盤から構成されており、対称性を考慮した1/2モデルである。橋脚、底版および周辺地盤には8節点固体要素、杭には4節点シェル要素を使用している。

鋼管矢板の継手部については、隣接する杭を4節点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、周辺地盤の対象範囲は、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、モデル対称面を対称条件とし、その他の周辺地盤側面は鉛直方向変位を拘束している。また、解析対象橋脚が支持している上部構造の質量は、橋脚天端の各支承位置にシェル要素を用いて与えている。

3.2 材料物性値

表-3 には、当該地点における地質調査結果に基づき設定した周辺地盤の動的物性値を示している。支持層である砂礫層は、せん断弾性波速度 $V_s=410\text{m/s}$ であり、工学的基盤面と判断される。また、表-4 には、RC部材および鋼管の材料物性値を示している。

3.3 入力地震動

図-4 には、線形時刻歴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 年十勝沖地震の本震時に一般国道 336 号十勝河口橋の基盤で観測された加速度波形とし、その最大加速度（159gal）を 100gal に振幅調整のうえで使用している。また、解析には主要動到達以前の波形は考慮せず、図に示す主要動 30 秒間のみを対象とした。

フーリエスペクトルより、入力地震動は 0.2~0.4Hz の低振動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。

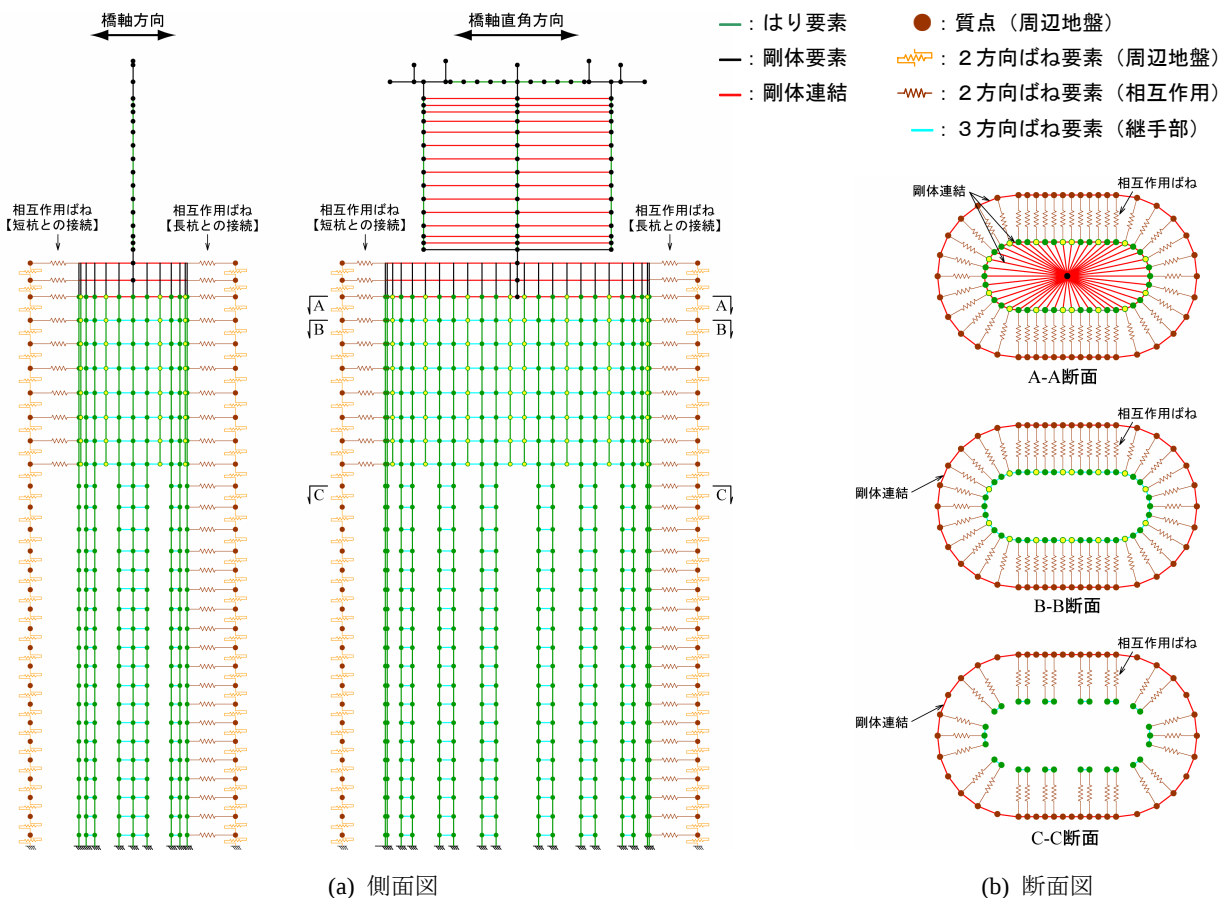


図-2 骨組モデル

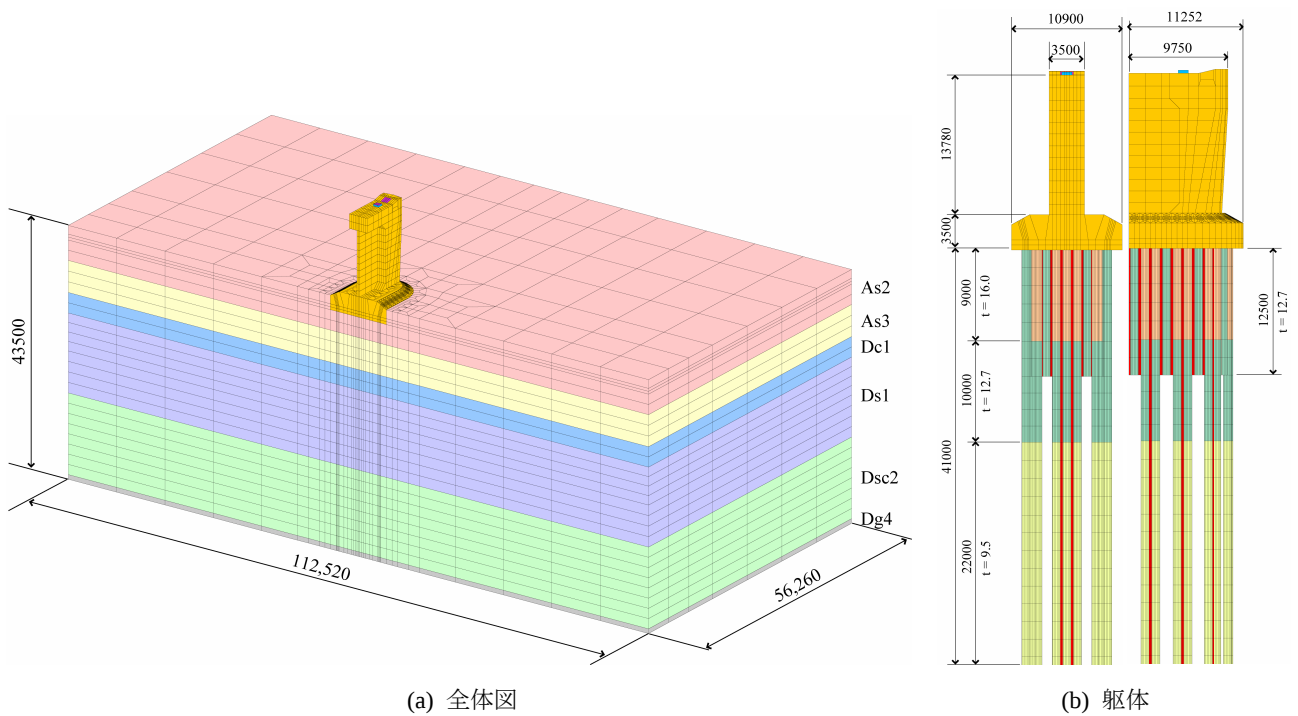


図-3 有限要素モデル

表-3 地盤 動的物性値

土層	単位重量 ρ (kN/m ³)	S波速度 V_s (m/sec)	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	18.2	190	0.490	195.8	65.7
As3	18.2	210	0.493	239.6	80.3
Dc1	16.8	150	0.489	112.5	37.8
Ds1	18.3	220	0.479	262.0	88.6
Dsc2	17.3	230	0.480	270.8	91.5
Dg4	20.0	410	0.473	990.2	336.2

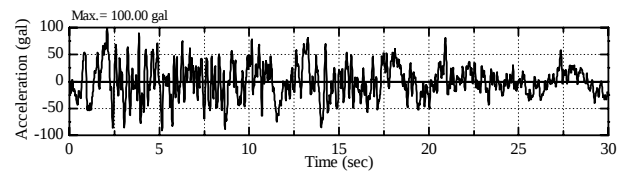
表-4 材料物性値

部材	単位重量 ρ (kN/m ³)	ポアソン比 ν	弾性係数 E (N/mm ²)
R C	24.5	0.2	30000
鋼管	77.0	0.3	206000

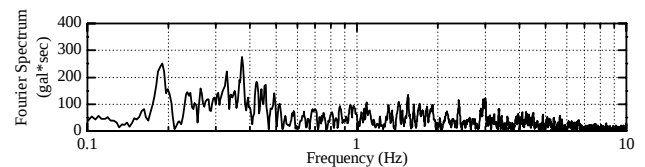
3.3 解析条件

骨組モデルおよび有限要素モデルに対して、それぞれ橋軸方向に対する固有値解析ならびに線形時刻歴応答解析を実施する。

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、骨組モデルには Newmark- β 法 ($\beta = 1/4$) を適用し、減衰は Rayleigh 型として 1 次および 2 次の固有振動数に対して $h=5.0\%$ 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 $h=5.0\%$ を与えている。また、地震動はどれも解析モデル下端に入力している。



(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

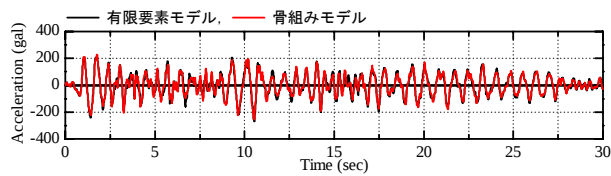
表-5 固有振動数

モード 次数	振動数 (Hz)		
	自由地盤	骨組モデル	有限要素モデル
1	1.25	1.25	1.25

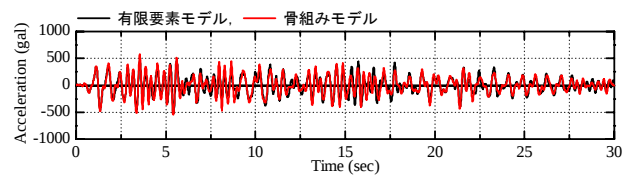
4. 解析結果

4.1 固有値解析

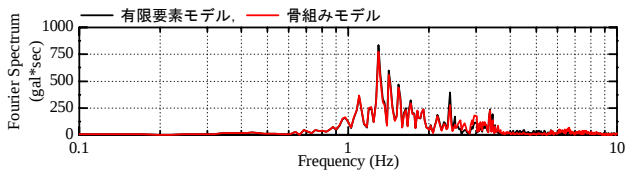
表-5 には、骨組モデルおよび有限要素モデルの 1 次の固有振動数を、質点-せん断ばねモデルによる自由地盤の固有振動数と併せて示している。固有振動数には解析モデルによる差は見られず、どれも自由地盤の固有振動数と一致していることが分かる。したがって、橋脚-基礎-地盤系においても自由地盤のせん断振動が卓越していることが分かる。



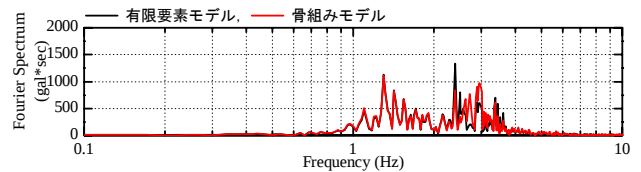
(a) 底版上面 相対応答加速度波形



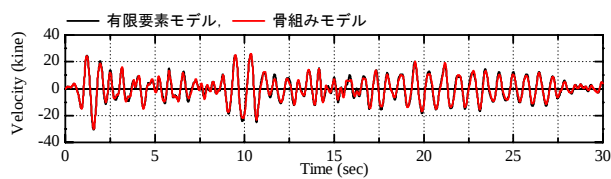
(a) 橋脚天端 相対応答加速度波形



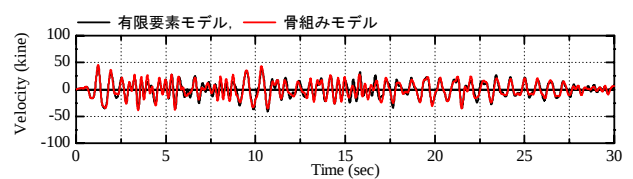
(b) 底版上面 相対応答加速度のフーリエスペクトル



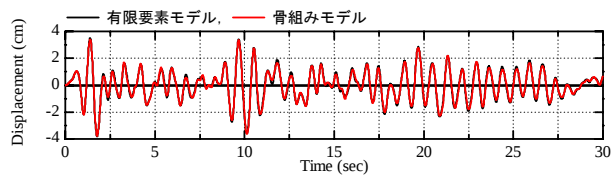
(b) 橋脚天端 相対応答加速度のフーリエスペクトル



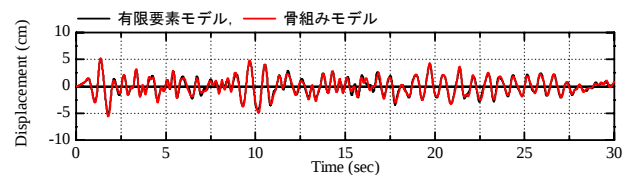
(c) 底版上面 相対応答速度波形



(c) 橋脚天端 相対応答速度波形



(d) 底版上面 相対応答変位波形



(d) 橋脚天端 相対応答変位波形

図-5 底版上面 応答波形

図-6 橋脚天端 応答波形

4.2 線形時刻歴応答解析

図-5 および図-6 には、底版上面ならびに橋脚天端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、骨組モデルと有限要素モデルを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。底版上面および橋脚天端の何れの点においても、骨組モデルと有限要素モデルの応答性状および振幅レベルが大略一致していることが分かる。このことは、応答加速度波形のフーリエスペクトルからも明らかである。

次に、相対応答速度波形と相対応答変位波形について考察する。底版上面および橋脚天端の何れにおいても、骨組モデルと有限要素モデルの応答性状および振幅レベルは非常に良く一致していることが分かる。

以上より、橋脚－基礎－地盤系の時刻歴応答解析に対する骨組モデルの適用性が確認された。

5. まとめ

本研究では、橋脚－基礎－地盤系を対象として、骨組モデルおよび有限要素モデルによる固有値解析ならびに線形時刻歴応答解析を実施し、周辺地盤の影響を考慮した橋梁構造物の動的解析に対する骨組モデルの適用性に

ついて検討を行った。

検討の結果、橋脚および基礎をはり要素、周辺地盤を質点とせん断ばねでモデル化し、基礎と地盤のモデルを相互作用ばねで連結した骨組モデルにより、三次元有限要素モデルによる解析結果を概ね再現可能であることが確認された。

なお、本検討は線形解析に限定していることから、骨組モデルの非線形問題への適用性については、更に検討が必要である。

参考文献

- (1) (社) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅳ下部構造編，2002.3.
- (2) (社) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅴ耐震設計編，2002.3.
- (3) (社) 土木学会：橋の動的耐震設計，2003.3.
- (4) (社) 日本鋼構造協会：鋼橋の耐震・制震設計ガイドライン，2006.9.
- (5) 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.