

直接基礎の地震応答解析に用いる SRモデルに関する一考察

二井伸一¹・運上茂樹²・遠藤和男³

¹正会員 独立行政法人土木研究所 耐震研究グループ 交流研究員（〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6）

²正会員 工博 独立行政法人土木研究所 耐震研究グループ 上席研究員（同上）

³正会員 独立行政法人土木研究所 耐震研究グループ 主任研究員（同上）

1. はじめに

橋梁設計の動的解析モデルは、地盤をバネ要素でモデル化するのが一般的であり、基礎の自由度をフーチングの水平(Sway)と回転(Rocking)の2自由度に集約したモデル(SRモデル)を用いる場合が多い。地盤のひずみ依存性、基礎底面の部分的剥離・滑動の非線形性が顕著となるレベル2地震時において構造物の応答を精度よく推定するためには、それらの非線形性や構造物と地盤の動的相互作用を適切に考慮する必要がある。本検討では、岩盤上に設置された直接基礎を有する1質点系構造物を対象に、上記非線形性や動的相互作用を考慮できる地盤を2次元平面ひずみ要素でモデル化した詳細モデルとSRモデルを用いた時刻歴非線形動的解析結果の比較を行い、SRバネ剛性の算出方法やSRモデルの解析精度、適用性に関する考察を行った。

2. 詳細モデルを用いた動的解析

(1) 解析モデル

SRモデルによる動的解析結果との比較の基準とする解析結果を得るために、地盤のひずみ依存性、基礎底面の部分的剥離・滑動、構造物と基礎の動的相互作用を考慮できるモデルで動的解析を行った。解析対象は、岩盤上に設置した高さ300m程度の吊橋の主塔構造物を想定した。解析モデルの概要を以下に示す。解析モデルを図-1に示す。

- ・地盤と基礎底版はFEM要素とし、上部構造は1質点はり要素(線形部材)とする。
- ・地盤は耐震設計上の基盤面($V_s=800\text{m/s}$ 相当)より上方をモデル化する。
- ・地盤の側面及び底面は、逸散減衰が考慮できる粘性境界とする。

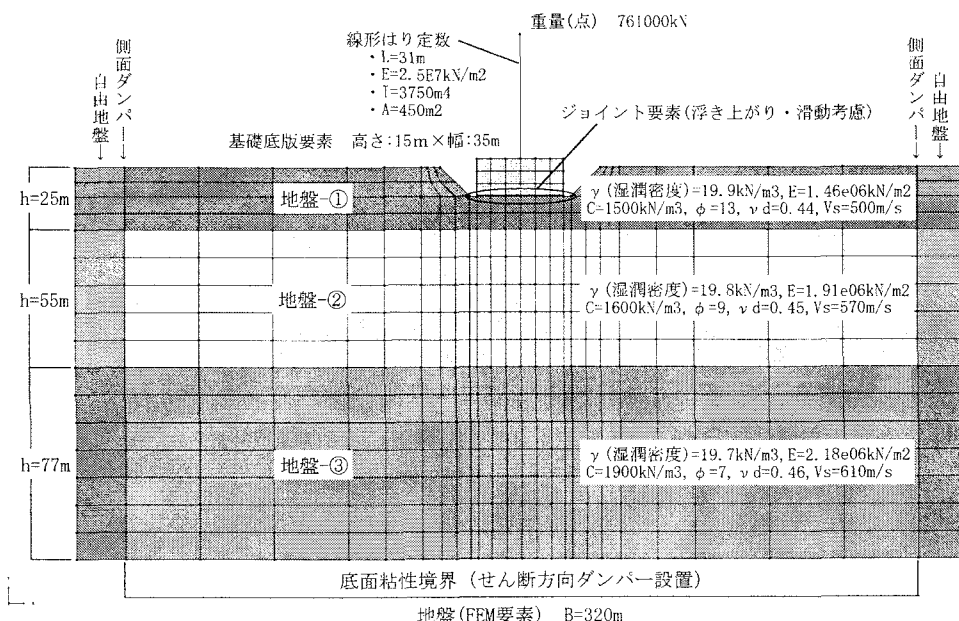


図-1 詳細モデル

- ・地盤は、ひずみ依存性が考慮できる非線形部材とする。(R-0モデル：図-2 参照)
- ・地盤と構造物の接続面に、基礎底面の部分的剥離・滑動が考慮できるジョイント要素を設ける。(図-3 参照)

(2) 入力地震波 (基盤波)

本解析に用いる基礎への入力地震波形を図-4 示す。

最大加速度:	975.268 gal	36.22 s
最小加速度:	-1119.88 gal	28.99 s

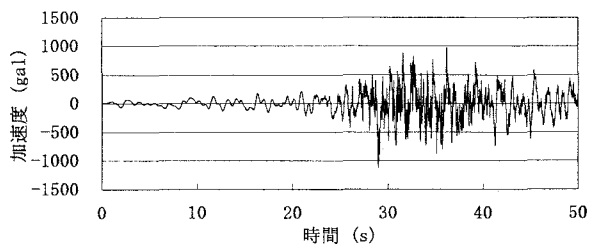


図-4 入力地震波 (基盤波)

(3) 減衰定数

本解析では Rayleigh 減衰を用いた。表-1 に示す各構造要素の減衰定数を用いて固有値解析を行い、ひずみエネルギー比例減衰により主要モード(図-5)の減衰定数を算定し、設定した。

主要モードは、X 方向(水平方向)の刺激係数の大きな上位2位のモードとした。図-6 に Rayleigh 減衰の設定結果を示す。

表-1 要素減衰定数

構造部材	減衰定数 (%)
梁要素	5.0
ブーミング	5.0
地盤	1.0

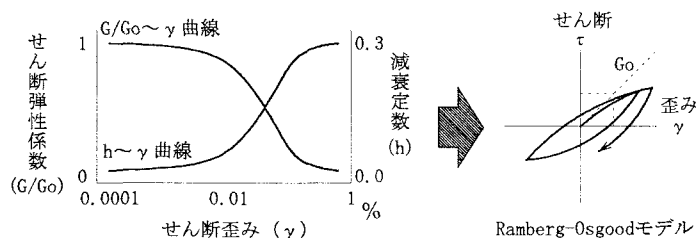
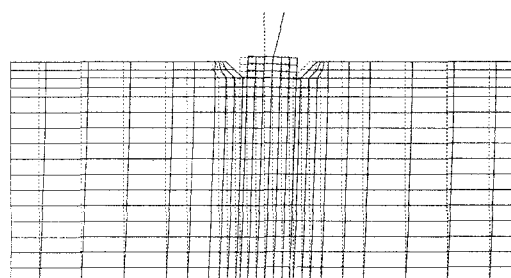
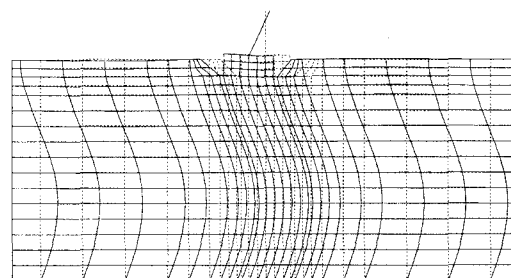


図-2 R-0 非線形履歴モデル



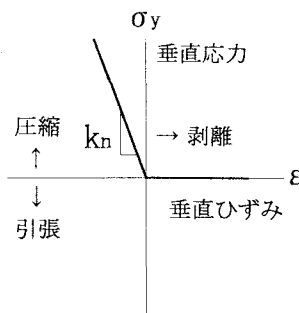
① 1次モード



② 6次モード

図-5 主要モード図

垂直方向ジョイント要素



水平方向ジョイント要素

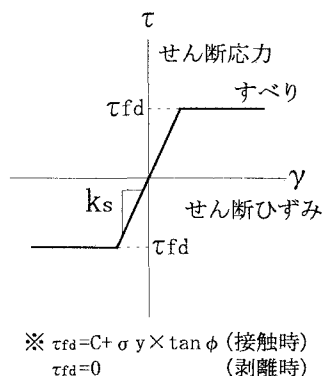


図-3 ジョイント要素

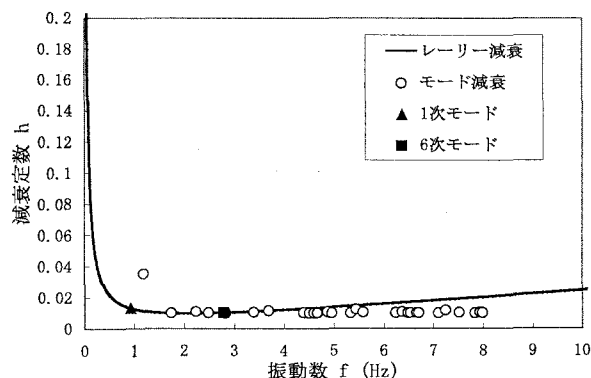


図-6 Rayleigh 減衰

3. SRモデルを用いた動的解析

(1) 解析モデル

SRモデルの概要を以下に示す。解析モデルを図-7に示す。

- ・基礎底版下面に水平及び回転の2自由度に集約したバネ要素(SRバネ)を設ける。
- ・SRバネの剛性を(4)に示す。
- ・基礎底版はFEM要素から1質点はりモデルに変更し、はり部は剛棒とする。
- ・上部構造(1質点はりモデル)の各定数は詳細モデルと同じにする。

(2) 入力地震波(地表面波)

SRモデル用の入力地震波形(地表面波)は、図-8に示す要領で、詳細モデルの構造物部分を取り除き、地盤のみのモデルとした状態で動的解析を行い、構造物の設置面で算出される応答加速度を抽出したものである。本波形を図-9に示す。

(3) 減衰定数

本解析に用いる減衰は、ひずみエネルギー比例型減衰を設定した。部材要素減衰定数を、表-2に示す。地盤については、SRバネに集約したため、10%と拡大した。

表-2 要素減衰定数

構造部材	減衰定数(%)
梁要素	5.0
フーチング	5.0
SRバネ	10.0

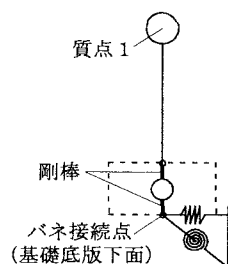


図-7 SRモデル

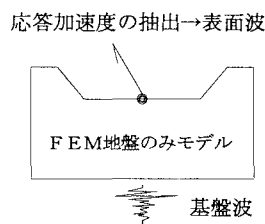


図-8 地表面波設定要領図

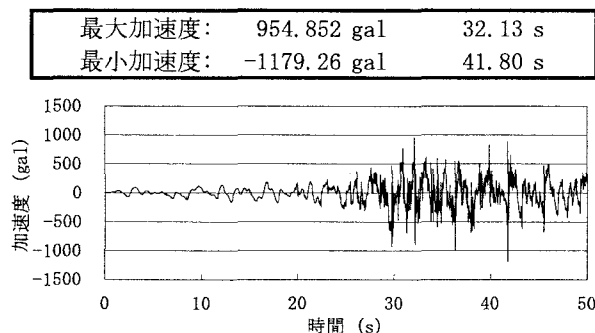


図-9 入力地震波形(地表面波)

(4) SRバネ剛性の設定

SRバネの剛性は以下に示す2ケースの方法により設定した。

a) SRバネ剛性の設定方法

a-1. プッシュオーバー解析から求めたバネ剛性

図-1に示した詳細モデルを用い、図-10に示す要領で基礎底版下面中心節点に強制節点力を負荷し、その応答値(水平力と水平変位及び曲げモーメントと回転角)から非線形SRバネ剛性を設定した。なお、解析モデルの物性値と、非線形特性は「2. 詳細モデル・・・」と同等としたが、地震動による地盤剛性低下は考慮しない。

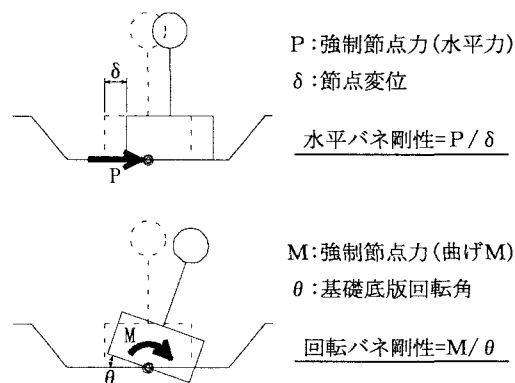


図-10 SRバネ剛性算定要領図

a-2. 詳細モデルの動的解析から求めたバネ剛性

詳細モデルの動的解析結果から、断面力-変位関係より、非線形SRバネ剛性を設定した。

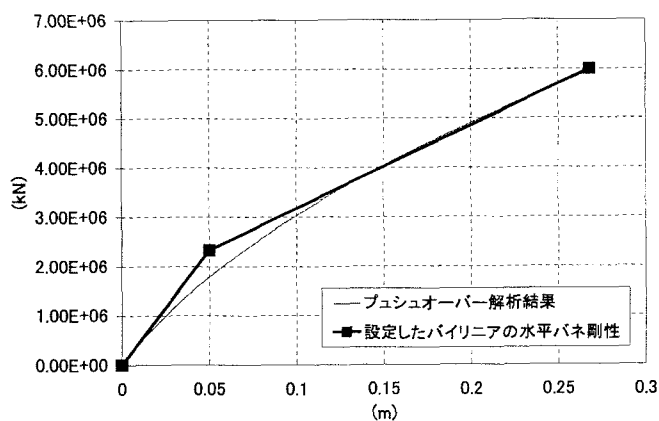
b) 設定したSRバネ剛性

SRバネ剛性を図-11～図-13、表-3に示す。

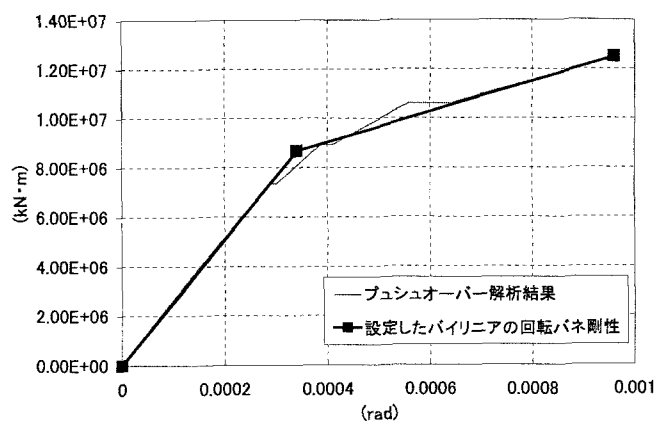
回転バネ剛性は、両解析結果から設定した値がほぼ同等となったが、水平バネ剛性は、プッシュオーバー解析により設定した1次剛性が動的解析により設定した1次剛性と比べて3倍程度大きくなった。これは、詳細モデルによる動的解析時には地盤モデル全体の剛性がひずみ依存性により低下するのに対し、プッシュオーバー解析時には地盤モデル基礎周辺の剛性のみ低下することによるものと考えられる。

表-3 SRバネ剛性一覧表

SRバネ剛性		プッシュオーバー解析	動的解析
水平 (kN/m)	1次勾配	4.67E+07	1.60E+07
	2次勾配	1.68E+07	9.75E+06
回転 (kN・m/rad)	1次勾配	2.55E+10	1.18E+10
	2次勾配	6.19E+09	4.40E+09

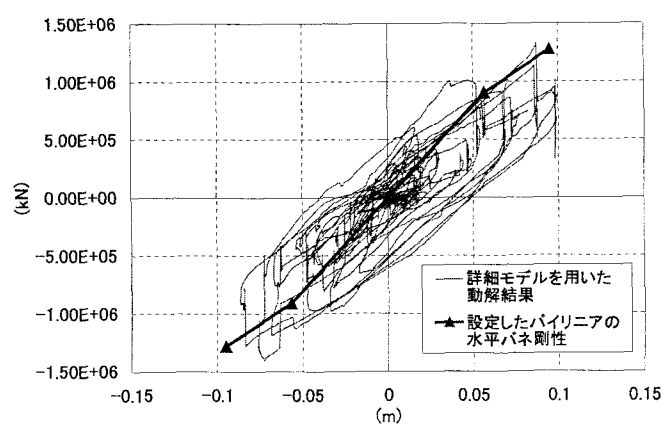


① 水平バネ剛性

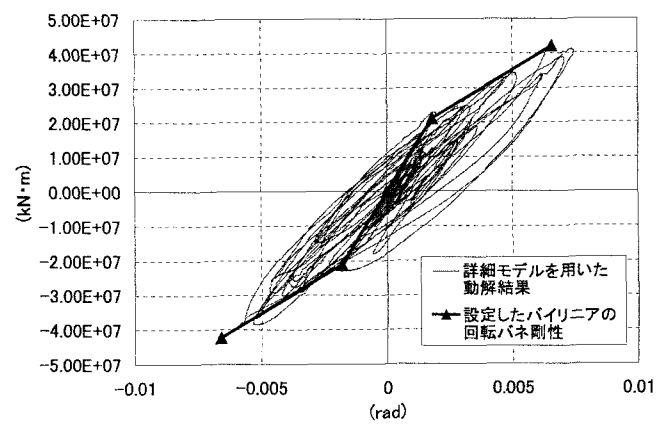


② 回転バネ剛性

図-11 プッシュオーバー解析から算定したバネ剛性

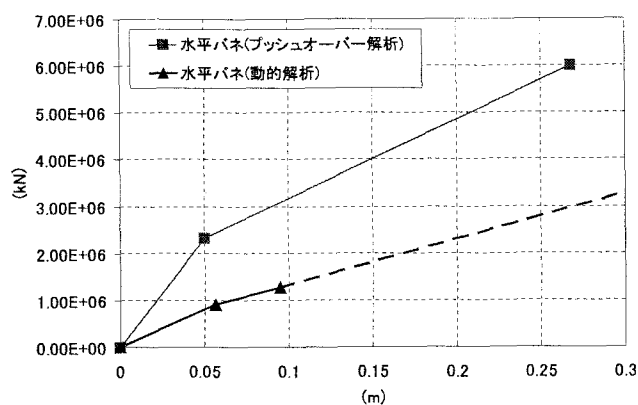


① 水平バネ剛性

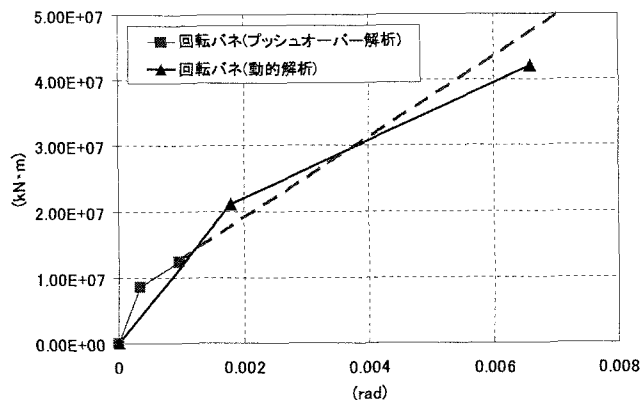


② 回転バネ剛性

図-12 動的解析から算定したバネ剛性



① 水平バネ剛性



② 回転バネ剛性

図-13 バネ剛性の比較

4. 解析結果の比較

詳細モデルとSRモデルの解析結果を図-14に示す。最大・最小応答値の比較表を表-4に示す。なお、各解析結果の算定要領を図-15に示す。解析結果の比較について、その傾向を列挙する。

① 質点1の水平変位

詳細モデルと、SRモデルによる応答値の周期特性はほぼ合致する。最大応答値は、詳細モデルと比較して、プッシュオーバー解析から求めたバネ剛性を用いたほうが4割程度小さく、動的解析から求めたバネ剛性を用いたほうが3割程度小さい。

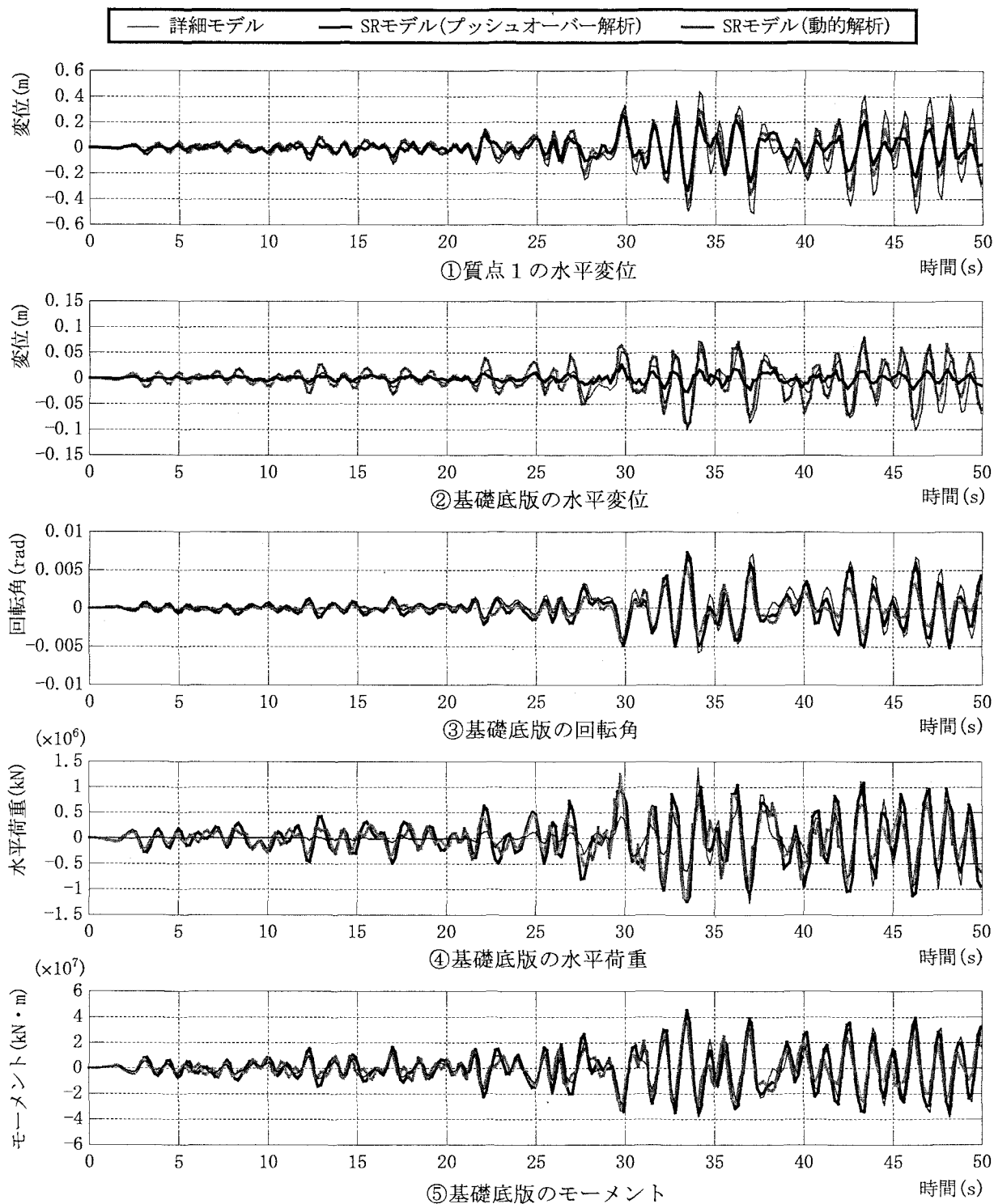


図-14 詳細モデルとSRモデル解析結果

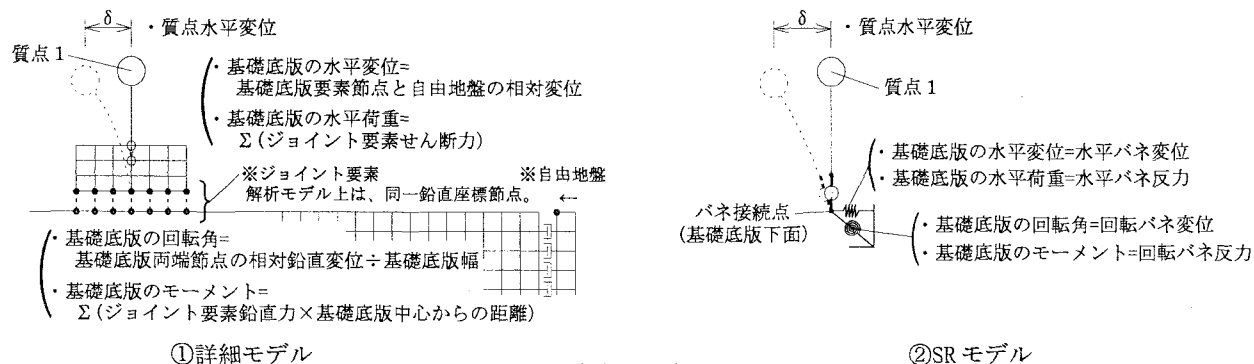


図-15 解析結果算定要領

表-4 最大・最小応答値比較表

		詳細モデル 解析結果	SRモデル解析結果	
			プッシュオーバー 解析結果バネ剛性	動的解析 結果バネ剛性
変 位	最大質点変位 (m)	4.64E-01	2.84E-01	3.23E-01
	比率	1.000	0.612	0.696
	最小質点変位 (m)	-5.47E-01	-3.33E-01	-4.46E-01
	比率	1.000	0.609	0.815
	最大底版変位 (m)	8.67E-02	2.96E-02	8.15E-02
	比率	1.000	0.341	0.940
	最小底版変位 (m)	-9.97E-02	-2.67E-02	-9.31E-02
	比率	1.000	0.268	0.934
	最大底版回転角 (rad)	7.48E-03	5.36E-03	7.44E-03
	比率	1.000	0.717	0.995
	最小底版回転角 (rad)	-5.87E-03	-4.38E-03	-5.12E-03
	比率	1.000	0.746	0.872

		詳細モデル 解析結果	SRモデル解析結果	
			プッシュオーバー 解析結果バネ剛性	動的解析 結果バネ剛性
断 面 力	最大底版水平力 (kN)	1.40E+06	1.38E+06	1.15E+06
	比率	1.000	0.986	0.821
	最小底版水平力 (kN)	-1.32E+06	-1.25E+06	-1.26E+06
	比率	1.000	0.947	0.955
	最大底版M (kN・m)	4.27E+07	3.97E+07	4.60E+07
	比率	1.000	0.930	1.077
	最小底版M (kN・m)	-3.92E+07	-3.37E+07	-3.58E+07
	比率	1.000	0.860	0.913

②基礎底版の水平変位

詳細モデルと動的解析から求めたバネ剛性を用いたほうの応答値は、周期特性・最大値ともほぼ合致する。プッシュオーバー解析から求めたバネ剛性を用いたほうは、周期特性はほぼ合致するものの、最大値は6割程度小さい。SRモデルの水平バネ剛性の差が影響したと考えられる。

③基礎底版の回転変位

詳細モデルと動的解析から求めたバネ剛性を用いたほうの応答値は、周期特性・最大値ともほぼ合致する。プッシュオーバー解析から求めたバネ剛性を用いたほうは、周期特性はほぼ合致し、最大値は3割程度小さい。

④基礎底版の水平荷重

地震力の小さい範囲 (0s~25s) で、両 SR モデルの応答値は大きくなるが、それ以後 (地震力が増す) の範囲で詳細モデルの応答値に近くなる。

⑤基礎底版のモーメント

詳細モデルと両 SR モデルは、周期特性・最大値ともほぼ合致する。

以上より、詳細モデルと両 SR モデルの応答は、両 SR モデルによる応答が多少小さめであるものの周期特性はほぼ一致しており、さらに、設計上主要となる断面力に関しては詳細モデルに対して-20~+10%程度の結果を与えることから、SRモデルによる手法は、一次近似の簡易計算としてはほぼ妥当であると考えられる。また、減衰定数あるいはプッシュオーバー解析時の地盤剛性の低減を適切に設定することにより、SRモデルの精度をさらに高めることが可能であると思われる。今後は、入力レベル、地盤条件等を変化させて、非線形性がさら大きい場合のSRモデルの適用性について検討を実施する予定である。

5. まとめ

本検討では、岩盤上に設置された直接基礎を有する1質点系構造物を対象に、各種非線形性 (地盤のひずみ依存性、基礎底面の部分的剥離・滑動) や動的相互作用を考慮した詳細モデルとSRモデルの時刻歴非線形動的解析を実施して両結果の比較を行い、SRバネ剛性の算出方法やSRモデルの解析精度、適用性に関する考察を行った。本検討より得られた知見をまとめると以下ようになる。

①プッシュオーバー解析と動的解析により算出したSRバネ剛性を比較した。回転バネ剛性は、両解析結果から設定した値がほぼ同等となったが、水平バネ剛性はプッシュオーバー解析により設定した1次剛性が動的解析により設定した1次剛性と比較して3倍程度大きくなった。これは、詳細モデルによる動的解析時には地盤モデル全体の剛性がひずみ依存性により低下するのに対し、プッシュオーバー解析時には地盤モデル基礎周辺の剛性のみ低下することによるものと考えられる。

②詳細モデルと両SRモデルの応答は、両SRモデルによる応答が多少小さめであるものの周期特性はほぼ一致しており、さらに、設計上主要となる断面力に関しては詳細モデルに対して-20~+10%程度の結果を与えることから、SRモデルによる手法は、一次近似の簡易計算としてはほぼ妥当であると考えられる。また、減衰定数あるいはプッシュオーバー解析時の地盤剛性を適切に設定することにより、SRモデルの精度をさらに高めることが可能であると思われる。