

塑性領域における1自由度系モデルと SRモデルの応答特性の比較

佐野弘幸¹・斉藤正人²・西村昭彦³

¹正会員 株式会社 テ ス (〒185-0034 東京都国分寺市光町2-8-38)

²正会員 (財) 鉄道総合技術研究所 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

³正会員 (財) 鉄道総合技術研究所 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

鉄道構造物の地震時における応答の算定は、「鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計(案)」¹⁾(以下、耐震標準と称す。)においては、基礎を支持ばねに置換したモデルの時刻歴動的解析法によるか、非線形スペクトル法を用いて算定できることとなっている。本報告では、非線形スペクトル法と時刻歴動的解析法による応答値を比較することを目的とし、非線形スペクトル法に相当する1自由度モデルの時刻歴動的解析と基礎を支持ばねに置換したモデルとして2質点3自由度モデル(以下、SRモデルと称す。)の時刻歴動的解析の結果を最大応答塑性率で比較を行う。

Key Words : Sway rocking model, Dynamic analysis, Demanded strength spectrum

1. はじめに

耐震標準の動的解析モデルの設定方法は、実構造物の静的非線形解析の結果に基づいて振動モデルの復元力特性を設定することとなっている。ここでは、SRモデルについては耐震標準の方法に準じて復元力特性を設定し、1自由度モデルは設定したSRモデルに基づいて固有周期や減衰定数、降伏震度を設定する。また、SRモデルの全体系としての最大応答塑性率の求め方を定義したうえで、SRモデルと1自由度モデルの応答値の比較を行う。

成分の抵抗力～変位曲線を求めて、バイリニアの骨格曲線に近似してSRモデルの地盤の水平ばねおよび回転ばねとする。上部構造に与える復元力特性は、基礎を固定して静的非線形解析を行った結果より橋脚天端位置の抵抗力～変位曲線を求めて、バイリニアの骨格曲線に近似した骨格曲線とする。なお、履歴特性は、クラフモデルを用いた。

減衰係数は、上部構造系の減衰定数を5%、ケーソン基礎～地盤系を20%と別々の要素として設定し、これらを重ね合わせて全体系の減衰係数とする要素別レーリー減衰係数²⁾を用いる。

2. SRモデルの設定方法と応答値の比較方法

(1) SRモデルの設定方法

a) ケーソン基礎構造物

ケーソン基礎構造物のモデル構成は、橋脚および上部構造を1自由度モデルとして表現し、基礎構造を剛体2自由度モデルとして設定する。

第1質点重量は上部工重量と橋脚く体重量の3割とした。第2質点は橋脚く体重量の7割とケーソン基礎の重量とケーソン基礎の回転慣性を考慮し、基礎の頂版位置に水平方向の地盤ばねと回転方向の地盤ばねを設定した。第1質点と基礎ばね設置点間の距離は頂版天端～橋脚天端の距離とする。実構造物とSRモデルの比較概要を図1に示す。

ケーソン基礎～地盤系に相当する復元力特性は、耐震標準に基づき、静的非線形解析の結果よりケーソン頂版位置での水平成分の抵抗力～変位曲線および回転

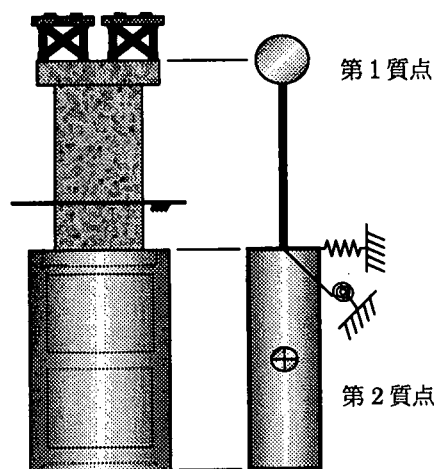


図1 実構造物とSRモデルの概要

b) 杭基礎構造物

杭基礎構造物のモデル構成は、橋脚および上部構造を1自由度モデルとして表現し、基礎構造はフーチン

グに水平方向および回転方向の反力を考慮した2自由度モデルとして設定する。

第1質点重量は上部工重量と橋脚く体重量の3割とした。第2質点は橋脚く体重量の7割とフーチングの重量とこれらの回転慣性を考慮し、フーチング底面位置に水平方向の杭頭・地盤ばねと回転方向の杭頭ばねを設定した。第1質点と基礎ばね設置点間の距離は橋脚天端～フーチング底面位置の距離とする。実構造物とSRモデルの比較概要を図2に示す。

杭基礎ー地盤系およびく体に相当する復元力特性と減衰係数は、ケーソン基礎と同様の方法で設定する。

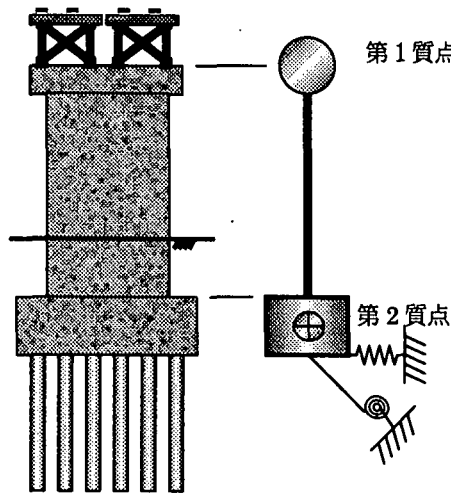


図2 杭基礎構造物とSRモデルの概要

(2) 応答値の評価方法

各基礎構造物ともに、降伏点は、SRモデルに対して静的非線形解析に相当する水平荷重を徐々に载荷して、く体、地盤水平、地盤回転のばねのうちのどれかが最初に降伏した点とする。降伏震度は、降伏点における第1質点の水平荷重を第1質点の重量で除した値とする。また、全体系の最大応答塑性率は、上部構造天端の最大応答変位を降伏変位で除して求める。

3. 1自由度モデルの設定方法

1自由度モデルの振動特性がSRモデルの全体1次の振動と等価となるように次の手順により設定した。

1自由度モデルの固有周期はSRモデルの固有値解析による1次の固有周期とし、降伏震度はSRモデルの降伏震度と同値とする。減衰定数は、SRモデルで設定した要素別レーリー減衰マトリックスを組み込んだ固有値解析の結果より1次モードに対応するものを用いた。ただし、骨格曲線と履歴性状については、耐震標準の非線形スペクトルの作成に用いられているパターンに準じて、第1勾配に対する第2勾配の比率を5%とし、履歴性状はクラフモデルとした。

4. 検討方法

(1) 検討ケースの設定

ケーソン基礎と杭基礎それぞれ3つの実構造物を基本モデルとして静的非線形解析を行い、前述の方法によりSRモデルを作成する(表1参照)。これらのSRモデルを基本パターンとして、く体、地盤水平、地盤回転それぞれのばねの骨格曲線の剛性と降伏耐力を変化させることにより検討ケースを増やして設定する。骨格曲線の設定概要を図3に示す。基本パターンに類似した現実的な構造物を検討ケースとして設定するために、骨格曲線は降伏変位を一定とした上で剛性と降伏耐力は同じ比率で変化させ、比率は基本パターンの骨格曲線に対して1.14倍～0.71倍の範囲で5段階とした。なお、ケースの設定に際しては、SRモデルの質点重量および回転慣性、質点間の距離などは一定とした。検討ケースは、各基本モデルに基づいて125ケースが設定されることになる。

表1-1 ケーソン基礎構造物諸元

	構造物1	構造物2	構造物3
上部構造物重量(t)	7602.8	4100.6	453.2
基礎重量(t)	8330.2	2994.5	316.9
基礎慣性モーメント($\text{tf} \cdot \text{cm}^2$)	1.787×10^9	1.082×10^9	1.832×10^7
橋脚高さ(cm)	2440	1308	500
基礎長(cm)	1350	2090	800
上部構造物減衰定数	0.05	0.05	0.05
基礎水平回転の減衰定数	0.20	0.20	0.20

表1-2 杭基礎構造物諸元

	構造物1	構造物2	構造物3
上部構造物重量(t)	373.4	1643.0	2077.0
基礎重量(t)	109.3	250.0	250.0
基礎慣性モーメント($\text{tf} \cdot \text{cm}^2$)	0.804×10^7	3.465×10^7	3.234×10^7
橋脚高さ(cm)	730	1100	760
基礎長(cm)	---	---	---
上部構造物減衰定数	0.05	0.05	0.05
基礎水平回転の減衰定数	0.20	0.20	0.20

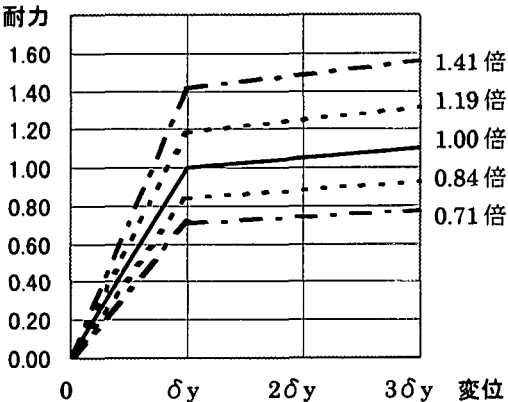


図3 骨格曲線の設定概要

(2) 入力地震動

入力地震動は、耐震標準で地盤種別ごとに設定されている地表面設計地震動を用いた。ここでいう地表面設計地震動とは、耐震標準で内陸型地震を想定して設定された各地盤種別ごとの弾性応答スペクトルの適合波である。検討に用いる地震動は、表2に示すG2～G4地盤の弾性応答スペクトルに適合させたものである。

表2 地盤種別

	地盤条件	固有周期(sec)
G2地盤	洪積層地盤	0.25以下
G3地盤	普通地盤	0.25～0.50
G4地盤	普通地盤～軟弱地盤	0.50～0.75

(3) 検討ケースの概要

設定した検討ケースの固有周期と降伏震度の分布を図4に示す。ケーソンの検討ケースの固有周期は0.8秒～2.2秒で、減衰定数は0.02～0.12に分布している。杭の固有周期は0.6秒～1.2秒で、減衰定数は0.03～0.21に分布している。

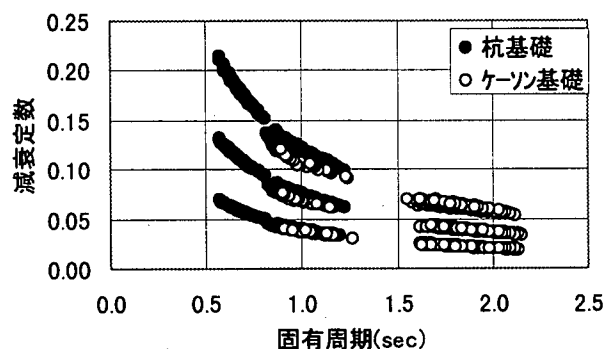


図4 固有周期と減衰定数

設定した検討ケースの固有周期と減衰定数の分布を図5に示す。ケーソンの降伏震度は0.20～0.42に分布し、杭は0.28～0.65に分布している。

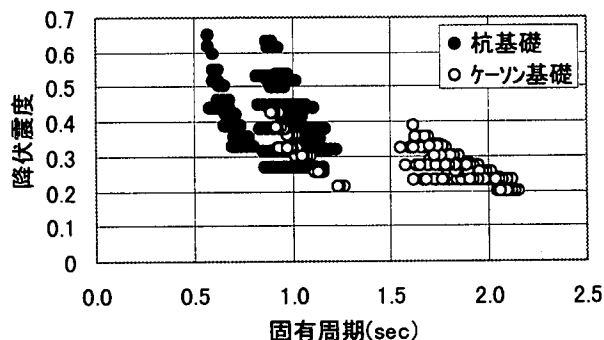


図5 固有周期と降伏震度

(4) 比較の方法

設定したSRモデルの検討ケースと等価な1自由度モデルを前述の方法により設定して、両モデルの弾塑性時刻歴応答解析を行い、それぞれの最大応答塑性率

を比較する。

5. 検討結果

(1) SRモデルと1自由度モデルの最大応答塑性率の比較について

a) 基礎種別の影響

最大応答塑性率の関係に対する基礎種別の影響を図6に示す。杭基礎についてはSRモデルと1自由度モデルの最大応答塑性率は等しいと言える。ケーソン基礎については、最大応答塑性率が6程度以下はほぼ等しいといえるが、最大応答塑性率が大きくなるとSRモデルの応答の方が大きくなる傾向が認められる。

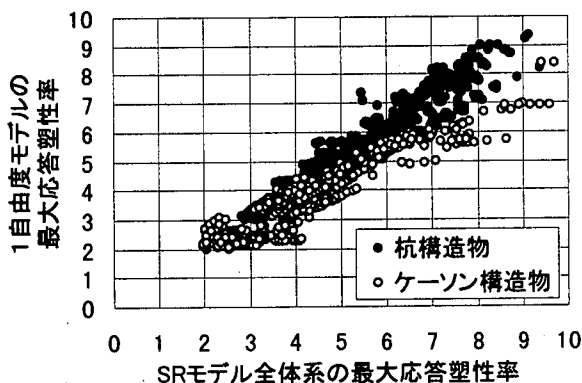


図6 基礎種別の影響

b) 地盤種別の影響

地盤種別の影響について検討したところ、特にG4地盤について影響が認められたため、ここでは、G4地盤と他の地盤について比較した結果を図7に示す。

G4地盤については他の地盤に比べて最大応答塑性率が大きい領域でSRモデルの応答の方が大きくなる傾向が認められる。しかし、全体的に見るとこの傾向は小さいと言える。

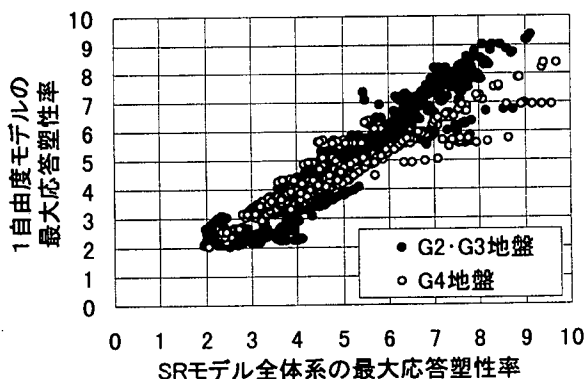


図7 地盤種別の影響

c) く体部分と基礎部分の耐力の関係による影響

各ケースごとのく体部分と基礎部分の耐力の大小関係による影響を検討した。く体部分と基礎部分の耐力

の大小関係は、SRモデルの降伏震度を求める際に最初に降伏する部位が、く体ばねの場合をく体先行降伏、水平地盤または回転地盤ばねの場合を基礎先行降伏と分類する。ケーソン基礎についての影響は図7に、杭基礎については図8に示す。

ケーソン基礎については、先行降伏する部位の違いによる影響は認められなかった。杭基礎のについては、く体先行降伏の方がSRモデルの最大応答塑性率が大きくなる傾向が認められる。

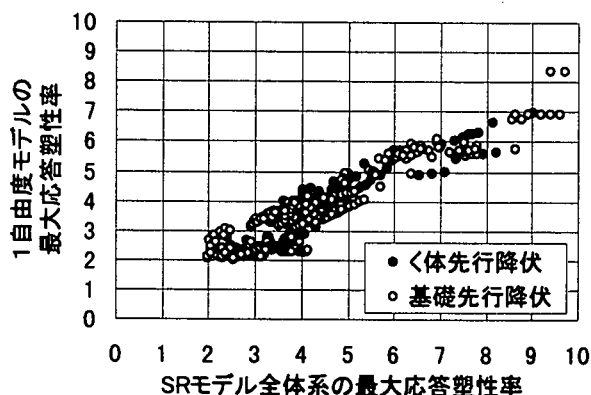


図7 ケーソン基礎の先行降伏部位の影響

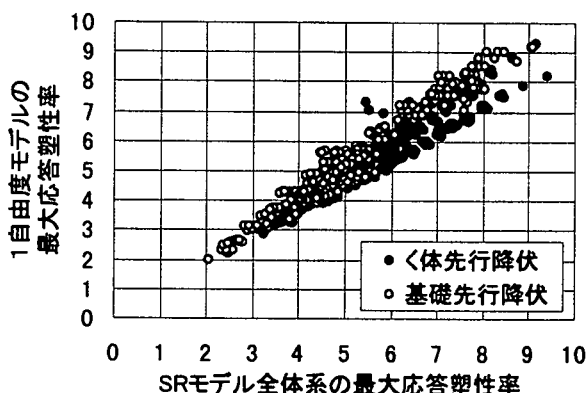


図8 杭基礎の先行降伏部位の影響

d) 特殊ケースの影響

ケーソン基礎で1自由度モデルに比べてSRモデルの最大応答塑性率が大きいケースを特定した結果を図9に示す。これにより、構造物3のモデルに基づいたケースであることがわかった。構造物3の諸元は、ケーソン基礎の規模が小さく上部構造の高さが低い構造であり、他の2つのケースと比べると特殊なケースであると考えられる。

(2) 非線形スペクトルとの比較

1自由度モデルと非線形スペクトルの最大応答塑性率の関係を図10に示す。1自由度モデルと非線形スペクトルの最大応答塑性率は、ほぼ等しい関係であることが分かる。これまでに検討した影響は非線形スペクトルにおいても認められることが考えられる。

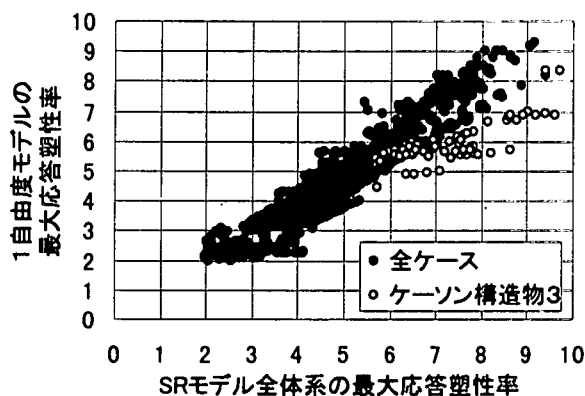


図9 特殊ケースの影響

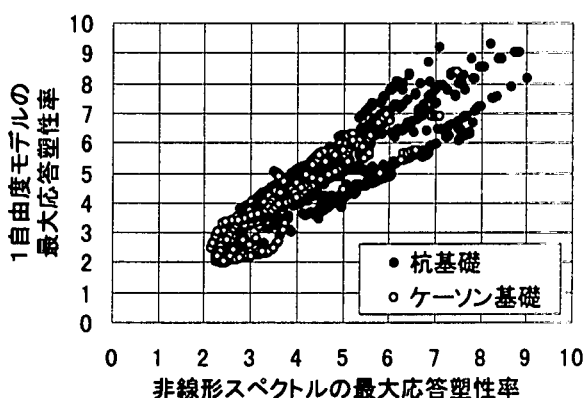


図10 1自由度モデルと非線形スペクトルの比較

6. まとめ

基礎種別の影響の検討では、ケーソン基礎の最大応答塑性率が大きい範囲においてSRモデルの応答が1自由度モデルより大きくなる傾向が認められた。地盤種別の影響の検討では、G4地盤においてSRモデルの応答が大きくなる傾向が認められた。先行降伏の部位による影響では、杭基礎において特徴が認められた。しかし、全体的に見るとこれらの傾向は微小なものであることがわかった。これらの検討結果より、1自由度系モデルで作成した非線形スペクトルにより、比較的正確な動的解析結果を求めることができると言える。

ただし、ケーソン基礎においてSRモデルの応答値の方が大きくなる例が認められた。これはケーソン基礎が小さく、上部構造の高さが低いといった比較的特殊な形状を有しているためと考えられる。今後、特殊な形状のケーソンについて検討を行い、非線形スペクトルの適用範囲を詳しく検討する所存である。

参考文献

- 1) (財)鉄道総合技術研究所：「鉄道構造物設計標準・同解説耐震設計(案)」
- 2) 佐野弘幸 齋藤正人：減衰特性が基礎—地盤—構造物系の応答に与える影響に関する研究, 地盤工学会研究発表回(投稿中)