

斜杭基礎高架橋における振動メカニズムに関する検討

(公財) 鉄道総合技術研究所 正会員 ○本山紘希 仲秋秀祐 室野剛隆 西岡英俊
 (独)鉄道建設・運輸施設整備機構 正会員 森野達也 陶山雄介
 (株)レールウェイエンジニアリング 正会員 青木一三

1. 目的

鉄道高架橋の耐震設計においては、応答値を所要降伏震度スペクトルを用いた非線形応答スペクトル法により算定するのが一般的である。これは、一般的な高架橋がトップヘビーな構造であり、地震作用を受けて振動する際に1次の振動モードが卓越するため、構造物全体の振動を1自由度系モデルの振動で表現できる¹⁾ことを考慮したものである。一方、斜杭基礎高架橋では、地盤変位の影響で水平振動と逆向きに回転振動(逆ロッキング動)が発生するため、線形解析における基礎的な検討においては、1自由度系モデルの振動で構造物全体の振動を表現するために、運動方程式に逆ロッキング動の影響を考慮する必要があることが分かった^{2),3)}。ここでは、より一般的に斜杭基礎高架橋における振動メカニズムを検討するため、構造物の非線形性も考慮して、構造物全体の振動と1自由度系モデルの振動の比較を行った。

2. 検討対象構造物と解析モデルの作成

本検討では、直杭基礎高架橋との比較を考え、斜杭基礎高架橋に加えて直杭基礎高架橋も検討対象とする。検討対象構造物のうち直杭基礎高架橋は、鉄道の耐震設計におけるG4地盤(普通~軟弱地盤)相当の地盤に対して設計されたものである(図1)。

斜杭基礎高架橋は、直杭基礎高架橋をプロトタイプとし、杭基礎に5度の斜角を与えた構造物として作成した。また、検討においては、地盤の違いについても考慮するため、上記G4地盤に対して、各層のN値を変更することにより、G3地盤(普通地盤)相当の地盤を作成した。図2に地盤の土質柱状図および両地盤のN値の深度方向分布を示す。以上により、構造物2種類(直杭・斜杭)、地盤2種類(G3地盤・G4地盤)を組合せた計4種類の検討対象構造物を作成した。

これに対し、構造物の応答を詳細に求めるための、詳細モデルを作成する。ここでは、図3に示すように、部材を梁要素、地盤をばね要素でモデル化した質点系モデルを作成した。本モデルは自由地盤も一体とした解析モデルとなっており、基礎位置への地震動の時刻歴波形の入力を想定した解析モデルとなっている。

次に、1自由度系解析に用いる解析モデルを作成する。1自由度系のモデル化においては、構造物のプッシュ・オーバー解析から得られる荷重-変位関係をトリリニア型の骨格曲線でモデル化し、1自由度系の復元力特性として設定する。図4にG3地盤における斜杭基礎を例に、荷重-変位関係とトリリニア型の骨格曲線でのモデル化を示す。

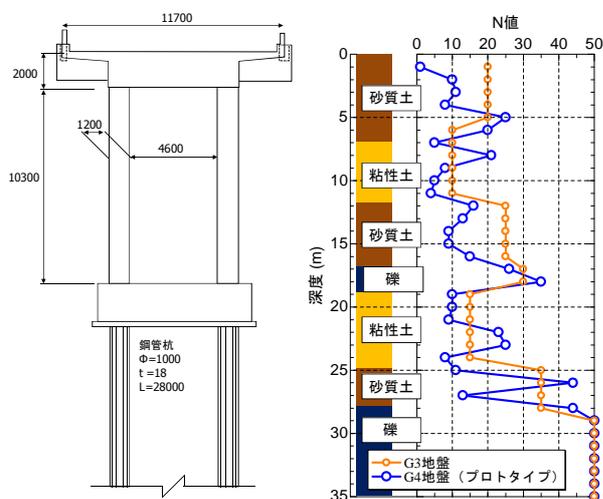


図1 プロトタイプとした高架橋の概要

図2 柱状図(G3・G4地盤)

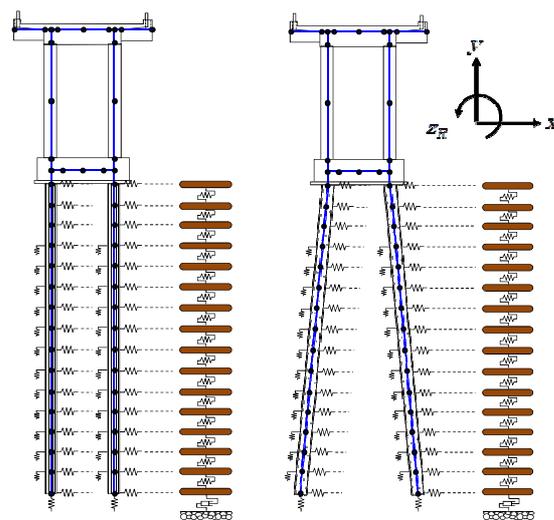


図3 検討に用いた解析モデル(左:直杭、右:斜杭)

キーワード 斜杭, 有効入力動, 逆ロッキング動, 有効入力動の回転成分

連絡先 〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38 (公財)鉄道総合技術研究所 耐震構造 TEL 042-573-7394

3. 逆ロッキング動を考慮した1自由度系の運動方程式

通常の構造物において、構造物の振動を表現する1自由度系の運動方程式は次式で示すものである。

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = -m\ddot{u}_{eff} \tag{1}$$

ここで、 m, c, k はそれぞれ質量、粘性、剛性を表し、 x は1自由度系の応答を表す。また、 \ddot{u}_{eff} は構造物に対する有効入力動であり、構造物に実際に入射される地震動と定義され、図3に示す解析モデルにおいて、上部構造物の質量を取り除き、地盤変位の影響のみを考慮した動的解析を行った時の基礎頂部での地震応答として算定される。この時、直杭基礎高架橋においては、有効入力動の回転成分が十分小さいため、式(1)は水平成分のみを考慮したものとなる。一方、斜杭基礎高架橋においては、有効入力動における回転成分（逆ロッキング動）の影響が大きいため、著者らは、これを考慮した1自由度系の運動方程式として、次式を提案している³⁾。

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = -m(\ddot{u}_{eff} - L\ddot{\theta}_{eff}) \tag{2}$$

ここで、 $\ddot{\theta}_{eff}$ は有効入力動の回転成分であり、 L は構造物高さである。この運動方程式の考え方を図5に示す。図に示すように、構造物高さに対応した回転振動 $L\ddot{\theta}_{eff}$ 分の低減を考慮することで、入力地震動が $L\ddot{\theta}_{eff}$ だけ低減されたような運動方程式が立式されることになる。なお、この時の回転成分の座標系は図5中に示す座標系である。

4. 解析結果

構造物の詳細モデルによる応答と1自由度系モデルによる応答を比較する。1自由度系モデルにおいては、有効入力動の回転成分を考慮しない場合(式(1))および有効入力動の回転成分を考慮した場合(式(2))についても比較を行う。直杭形式では、有効入力動の回転成分はほぼゼロであるが、確認のため回転成分を考慮した1自由度系解析も行なっている。解析結果について、G4地盤の解析結果のみ示す。5秒間の加速度応答を抜き出し、図6に示した。直杭のケースにおいては、回転成分の考慮の有無にかかわらず、詳細モデルによる解析の結果は1自由度系の解析により表現されている。一方、斜杭においては、式(2)により回転成分を考慮した場合の方が、詳細モデルの解析結果を適切に表現できている。また、同様の結果がG3地盤による解析でも確認された。

5. おわりに

斜杭基礎高架橋において、非線形解析でも、逆ロッキング動を考慮することで、構造物全体の振動を1自由度系の解析で表現できることが分かった。これにより斜杭基礎高架橋においても、非線形応答スペクトル法の適用による構造物の応答値算定の可能性が示されたと言える。

参考文献：1) 室野剛隆，佐藤勉：構造物の損傷を考慮した非線形応答スペクトル法の適用，土木学会地震工学論文集，29巻，pp520-528，2007.8. 2) 本山紘希，室野剛隆，仲秋秀祐，西岡英俊，米澤豊司，森野達也，青木一二三：斜杭基礎を有する構造物での有効入力，第67回土木学会年次学術講演会講演概要集，2012. 3) 仲秋秀祐，室野剛隆，本山紘希，米澤豊司，森野達也，青木一二三：斜杭基礎を有する構造物の非線形スペクトル法に関する基礎的な検討，第67回土木学会年次学術講演会講演概要集，2012.

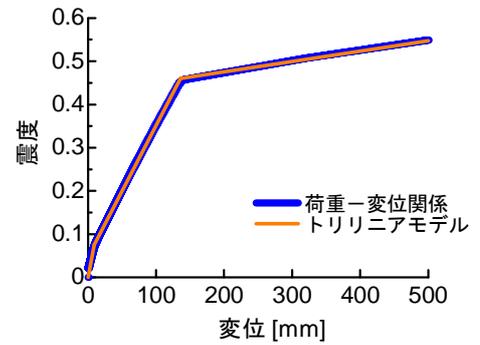


図4 G3地盤・斜杭基礎構造物の荷重-変位関係とトリリニア型によるモデル化

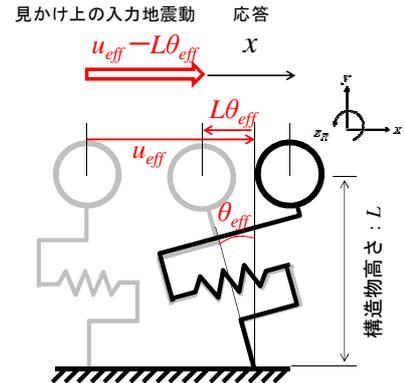


図5 有効入力動の水平成分を考慮した場合の1自由度系モデルの考え方

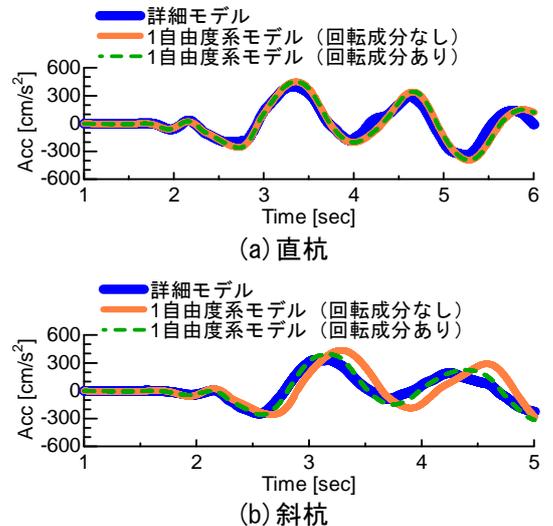


図6 詳細モデルと1自由度系モデルの比較