

斜杭基礎高架橋における列車走行安全性の向上に関する検討

(公財) 鉄道総合技術研究所 正会員 ○本山紘希 酒井大央 室野剛隆 西岡英俊

(独)鉄道建設・運輸施設整備機構 正会員 高野裕輔 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. はじめに これまで著者らは斜杭基礎高架橋の応答低減効果のメカニズムを解明し、その効果を積極的に用いた応答値算定手法を提案してきた^{1),2)}。具体的には、応答低減効果は地盤変位の影響により生じる逆ロッキング動によることを解明し、静的に地盤変位を作用させて得られるロッキング量から非線形応答スペクトル法で使用可能な応答低減係数を算定する手法を提案した。これらの検討は L2 地震動に対する検討であり、比較的地盤の変形が大きい入力地震動が対象となっている。一方、鉄道高架橋においては、走行安全性^{3),4)}の検討において L1 地震動を使用し、軟弱地盤においては走行安全性が構造諸元の決定ケースとなることも多い。そこで本検討では、L1 地震動のような低加速度で地盤・構造共に塑性化しにくい入力地震動においても、斜杭基礎の応答低減効果が表れるかについて検討する。

2. 列車走行安全性の照査の考え方 変位制限標準では、列車走行安全性を構造物天端の応答波形により算定された応答 SI 値がある限界値に収まることで照査する。ここで、応答 SI 値とは構造物天端の応答に対して、速度応答スペクトル（減衰 5%）を計算し、得られた速度応答スペクトルに対して次式を適用し算定するものである。

$$SI = \int_{0.1}^{2.5} S_v(T) dT \quad (1)$$

ここで、 T は周期、 S_v は速度応答スペクトルの振幅である。本検討では、L1 地震動に対する応答値としては、応答 SI 値を対象とする。

3. 斜杭基礎高架橋の L1 地震動に対する応答 対象構造物は、図 1 に示す斜杭基礎高架橋であり、鉄道の耐震設計における G4 地盤（普通～軟弱地盤）において設計されたものである。また、パラメータスタディのための地盤条件として、N 値を変更することにより G5 地盤（軟弱地盤）を作成した。それぞれの地盤の土質柱状図および N 値の深度分布を図 2 に示す。

下記の検討では、構造物の応答解析に 1 自由度系の解析を用いるため、L2 地震動に対する検討（非線形応答スペクトル法の適用性の検討）と同様、まずは、1 自由度系のモデルにより地震応答を表現可能であることを確認する¹⁾。確認は詳細モデルによる応答値と 1 自由度系モデルによる応答値を比較することによる。詳細な応答値算定においては図 3 に示す構造物系と自由地盤系を一体としたモデル（一体型モデル³⁾）を用い、基盤位置に L1 地震動（図 4）を入力し、応答値を算定する。1 自由度系のモデルには図 3 に示す構造物のプッシュ・オーバー解析により算定した荷重－変位関係を非線形特性として与える。本検討では、非線形特性の骨格曲線にトリリニアモデルを用いた。さて、これまでの L2 地震動に対する検討の成果として斜杭基礎高架橋では基礎に逆ロッキング動が発生するため、1 自由度系の解析において、通常の水平方向のみの入力を考慮した運動方程式（式(2)）ではなく、

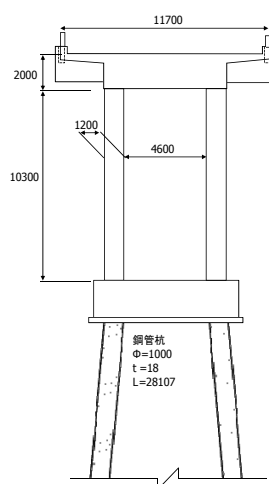


図 1 対象構造物

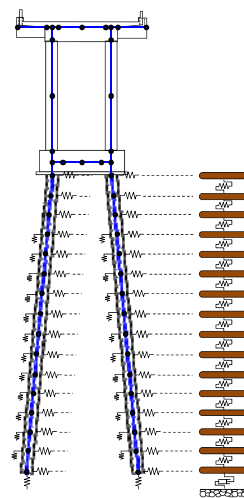


図 3 一体型モデル

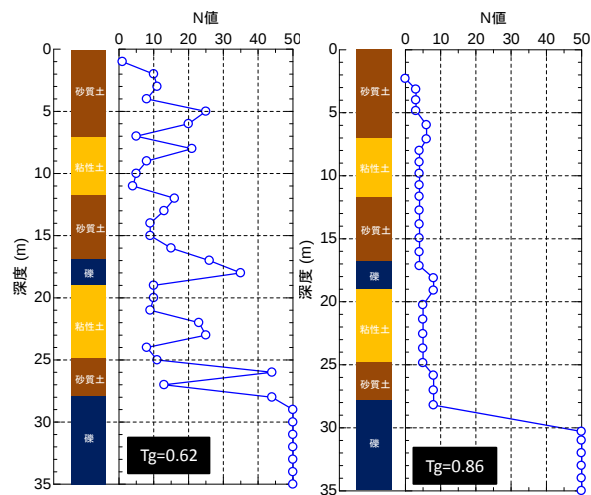


図 2 土質柱状図と N 値分布（左：G4，右：G5）

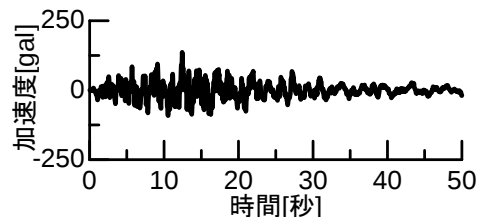


図 4 L1 地震動波形

キーワード 斜杭、車両走行性、有効入力動、逆ロッキング動

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

式(3)の運動方程式を用いることで精度が向上することが分かっている²⁾。

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

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = -m(\ddot{u}_{eff} - L\ddot{\theta}_{eff}) \quad (3)$$

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。 $\ddot{u}_{eff}$ は構造物に対する有効入力動の水平成分であり、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。また、式(3)に表れる $\ddot{\theta}_{eff}$ は有効入力動の回転成分、 L は構造物高さであり、式(3)では見かけ上 $L\ddot{\theta}_{eff}$ の分だけ入力を低減することで、斜杭基礎高架橋に特徴的な逆ロッキング動の影響を表現している。地盤変位がL2地震動に比較して小さいと考えられるL1地震動についても、式(3)の適用性を検討する。

詳細モデルによる応答値と1自由度系モデルによる応答値を比較した結果を図5に示す。1自由度系モデルの応答については式(2)を用いた結果および式(3)を用いた結果の2つを示した。図より、L1地震動についても、式(3)の方が精度よく詳細モデルの応答値を表現可能であることが分かる。また、応答低減効果はより軟弱な地盤であるG5地盤で顕著に表れることが分かる。

4. L1地震動における応答低減効果 本検討では、直杭基礎高架橋における応答SI値と斜杭基礎高架橋における応答SI値を算定し、両者を比較することで斜杭基礎の応答低減効果について検討する。構造物の応答値算定では、上記で適用性が確認できた1自由度系の解析を用いる。1自由度系の解析において、直杭基礎高架橋では式(2)の運動方程式を斜杭基礎高架橋では式(3)の運動方程式を用いれば良い。また、各地盤条件に対して、検討構造物の固有周期を基本(G4地盤中の高架橋：1.19秒、G5地盤中の高架橋：1.24秒)に、別途2ケースの固有周期についてもパラメータスタディを行った。

直杭基礎高架橋の応答SI値に対する斜杭基礎高架橋の応答SI値の倍率を図6(実線)に示す。両地盤について、斜杭基礎高架橋で応答の低減が確認できる。図6では文献2)に示されているL2地震動に対する簡易応答低減手法(図7)により応答倍率を算定した結果も点線で示した。実際の応答SI値の倍率および簡易手法による応答倍率の両方で、G5地盤の方がG4地盤に比べて応答低減効果が顕著であり、両手法で整合する結果が得られた。また、いずれの地盤条件・構造条件においても、簡易手法での応答倍率の評価が安全側の評価となっている。

5. おわりに 斜杭基礎高架橋の応答低減効果について、L1地震動に対する検討を行った。検討の結果、これまで検討してきたL2地震動に対する結果と同様、L1地震動でも斜杭基礎の応答低減効果が表れることが分かった。また、応答低減効果を簡易に評価するには、L2地震動に対する検討で提案した手法が安全側の手法として使用できることが分かった。

参考文献：1)本山，仲秋，室野，西岡，森野，陶山，青木：斜杭基礎高架橋の地震応答算定における静的解析法の適用性，性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，16巻，pp85-90，2013.7. 2)仲秋，本山，室野，西岡，森野，陶山，青木：斜杭基礎高架橋における地震慣性力の評価手法の提案，性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，16巻，pp91-94，2013.7. 3)国土交通省監修，鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説(耐震設計)，丸善，2012.9. 4)国土交通省監修，鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説(変位制限)，丸善，2006.2.

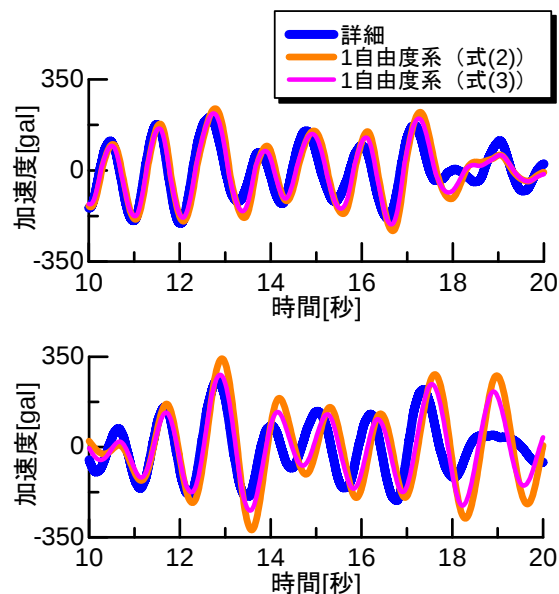


図5 詳細解析と1自由度解析比較
(上：G4地盤，下：G5地盤)

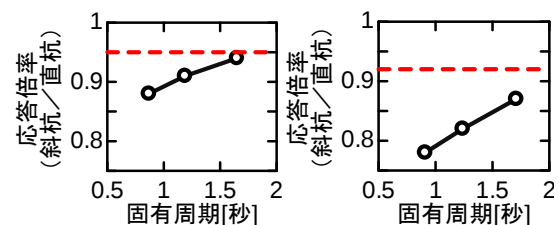


図6 応答倍率(斜杭/直杭)
(左：G4地盤，右：G5地盤)

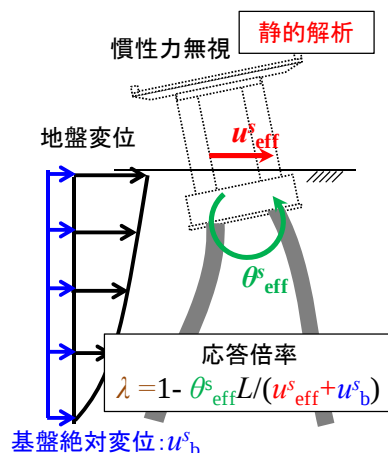


図7 簡易応答低減手法(応答倍率の算定)