

## 超連続基礎を有する高架橋の地震時挙動

鉄道地震工学研究センター 地震動力学研究室

研究員 田中 浩平

### 1. はじめに

鉄道や道路構造物は、線状に連続して構築されるため、表層地盤構造は地点ごとに大きく変動する。したがって、柱ごとに独立したフーチング基礎を有する一般的な高架橋（独立基礎高架橋）では、地震時において次のような様々な課題が想定される。表層地盤構造により、地点ごとに地震動の増幅特性が異なるために、地点依存の設計が必要となり、設計・施工コストが増大する。更に、構造物上に設置される電化柱や防音壁等の付帯構造物にも個別の設計が必要となる。隣接構造物間では目違いや角折れが発生し、車両の走行安全性に影響を及ぼす<sup>1)</sup>。

これらの課題を解決する方法として、フーチング基礎を線路方向に 100～1000m 程度連続化した「超連続基礎」を有する高架橋（超連続基礎高架橋）を提案する。フーチング基礎が一体となって挙動することで、連続化した区間の基礎位置の有効入力動が一樣化する効果等が期待できる。超連続基礎の利点を以下に示す（図1参照）。

- ① 有効入力動が一樣化され、構造物や付帯構造物に対して、個別の地盤条件に配慮した設計を実施する必要がない。これにより、設計・施工コストが削減できる。上部構造物のプレキャスト化も容易となり、施工性および品質の向上が期待できる。
- ② 上部構造物への有効入力動が一樣化されることにより、隣接構造物間の線路直角方向の挙動が一樣となるため、目違いや角折れが減少し、車両の走行安全性が向上する。
- ③ 地盤調査が実施されていない地点においては、局所的に大きな地震動が入力する可能性がある。超連続基礎を有する高架橋では、このような事前に想定できない局所的な有効入力動が生じてても一樣化される。設計で想定されていない地震動が入力した場合に甚大な被害が発生しないという「危機耐性」<sup>2)</sup>の面においても優れている。
- ④ 連続化した大きなフーチング基礎底面により支持力が期待できるため、杭本数や杭長の低減や、杭配置の自由度が増す。地点によっては、直接基礎とすることも可能となる。
- ⑤ 地震動の入力損失効果についても期待でき、独立基礎高架橋に比べて設計地震動が低減できる可能性もある。

本検討では、超連続基礎を有する高架橋に対して、杭基礎と直接基礎の2つの基礎形式について、有効入力動の一樣化効果や車両の走行安全性の向上効果を検討した。また、基礎の連続化による上部構造物の地震時挙動の違いについて、その特性を整理した。

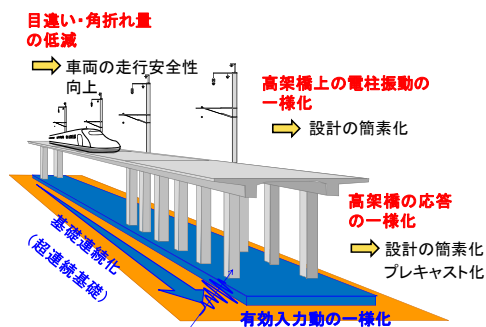


図1 超連続基礎高架橋の概要

### 2. 杭基礎形式の超連続基礎高架橋

杭基礎形式の超連続基礎高架橋において動的解析による地震時挙動の把握を行った。各構造物は図2に示す諸元とし<sup>3)</sup>、超連続基礎高架橋は連続する5橋脚のフーチングを連続化したものとした。なお、各橋脚位置の地盤種別は図3のようになっており、地盤種別ごとに異なる地盤ばねと入

力地震動を設定した。杭基礎は、プッシュオーバー解析の結果得られた水平・回転ばねを基礎位置に設定したスウェイ・ロッキングばねによりモデル化した。

図4に線路方向のフーチング位置の最大応答値分布を示す。線路方向の応答値は、超連続基礎モデルで一様化していることがわかる。また、超連続基礎モデルの最大応答値は、独立基礎モデルの地点ごとの変動の範囲内にある。線路直角方向の応答値は、地盤種別によってやや変動するが、独立基礎モデルに比べるとその程度は小さく、一様化効果がみられる。また、フーチング基礎位置の応答が一様化されるため、高架橋天端位置での応答値も一様化することを確認している。

続いて上部構造物の振動特性の変化について考察を行う。図5にプッシュオーバー解析における地盤の回転ばねの挙動を示す。超連続基礎では、線路方向のばねがほとんど回転しないことがわかる。これは、連続化したフーチング基礎の剛性で、基礎の回転変形が拘束されることが原因である。これにより、連続基礎の上部構造物は独立基礎高架橋と比べ線路方向に短周期で応答する。フーチング基礎上に構築される上部構造物は同一でも、下部の拘束条件により応答の周期特性が異なり、2つのモデルで異なる挙動となる。なお、線路直角方向については、フーチング基礎による回転拘束の効果が小さいため、上部構造物は独立基礎モデルに近い挙動となる。

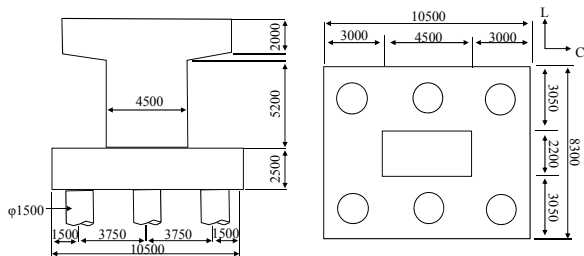


図2 構造物モデル

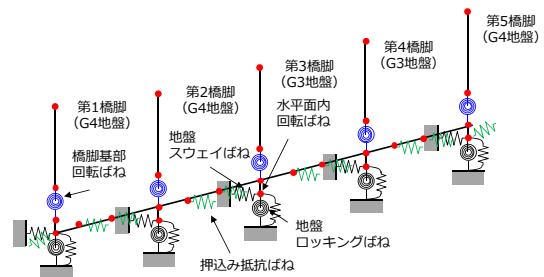
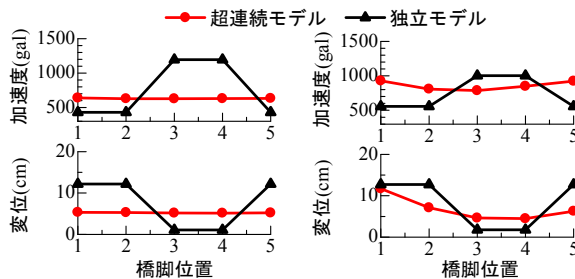
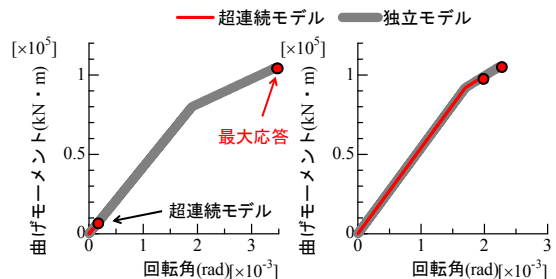


図3 杭基礎形式の超連続基礎モデル



(a) 線路方向 (b) 線路直角方向

図4 フーチング基礎位置の最大応答値分布



(a) 線路方向 (b) 線路直角方向

図5 地盤の回転ばねの挙動

### 3. 直接基礎形式の超連続基礎高架橋

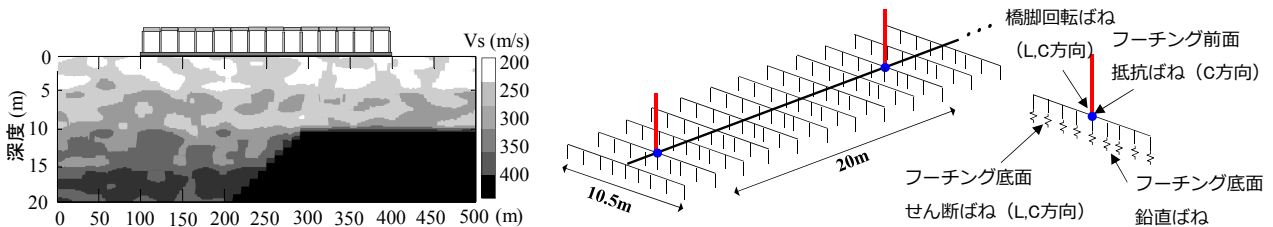
直接基礎形式の超連続基礎高架橋において動的解析による地震時挙動の把握を行った。解析モデルは、図6に示すように全長500m領域の地盤モデル上に300mの構造物を設定している。地盤モデルは、図6(a)に示すせん断弾性波速度Vsを不均質にばらつかせたモデルとした。図6(b)は構造物のモデル化を示す。超連続基礎モデルは、フーチング基礎を300m連続化したRC単柱式橋脚とし、上部構造物やフーチング基礎の諸元は2.の杭基礎形式と同様のものを用いた。直接基礎としての地盤抵抗のモデル化を分布ばねモデルで行うために、荷重直角方向の幅を8分割してモデル化を行った。地盤抵抗のモデル化は、図6(b)に示すようにフーチング底面のせん断ばねと鉛直ばね、フーチング前面の抵抗ばねの3種類を用いて行った。

図7に、各方向のフーチング基礎位置の最大応答値分布を示す。図7に示すように、フーチン

グ基礎位置の加速度、変位ともに、超連続基礎モデルで一様化していることが確認できる。なお、フーチング基礎位置の変位は、超連続基礎モデルが独立基礎モデルの上限値程度の値となっている。これは、フーチング基礎が一体となって挙動するため、変位の大きい地点に基礎全体が追従するためである。図7で独立基礎の変位量が小さい地点（例えば160m地点）の地盤のせん断ばねは、超連続基礎モデルで塑性率が大きくなっており、基礎が滑動する挙動が見られた。

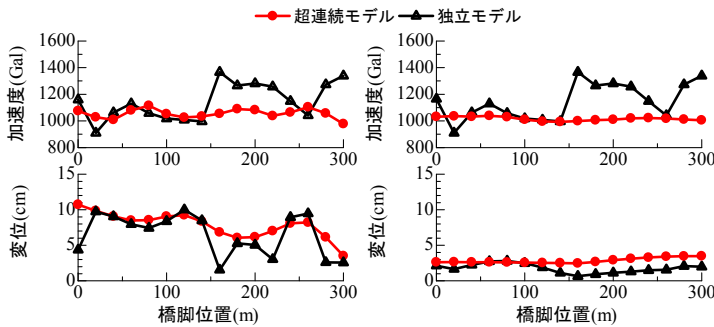
図8上段に示すように、フーチング基礎位置の最大回転角は、独立基礎モデルに比べて超連続基礎モデルで小さくなる。これは、超連続基礎モデルでフーチング基礎の底面積が大きく、鉛直支持力が大きいことが理由である。その結果、図8下段に示すように、高架橋天端における最大変位は超連続基礎モデルで小さくなる。フーチング基礎の回転が抑えられているためであり、回転量の差(0.25rad)に高架橋高さ(7.0m)を乗じた程度の変位量分(17.5cm)が小さくなる。

図9にプッシュオーバー解析の結果得られたフーチング基礎位置の回転角と震度の関係を示す。超連続基礎モデルでは、いずれの方向にも回転しないことが確認できる。すなわち、直接基礎形式の超連続基礎高架橋では、線路および線路直角方向のいずれにおいても、上部構造物は独立基礎モデルに比べて短周期で応答する。図10に各橋脚位置における最大角折れ量を示す。上部構造物の応答変位は一様化され、独立基礎モデルと比べて角折れ量が小さくなることが確認できる。



(a) 地盤モデル (b) 直接基礎形式の超連続基礎モデル

図6 解析モデル図



(a) 線路方向 (b) 線路直角方向

図7 最大加速度・変位分布

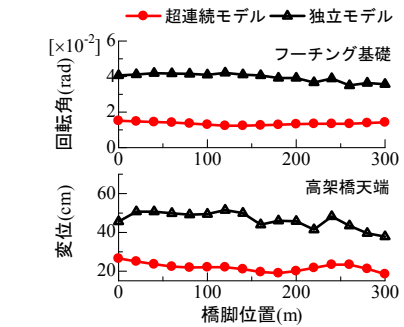
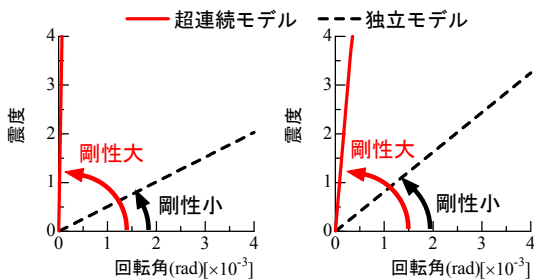


図8 最大回転角・変位分布 (線路直角方向)



(a) 線路方向 (b) 線路直角方向

図9 基礎の回転量と震度の関係

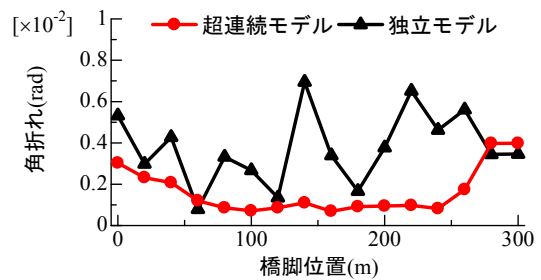


図10 最大角折れ分布

#### 4. 地震時走行安全性に対する効果

3. で作成した 300m の直接基礎形式の高架橋に対して車両走行安全性の向上効果について検討した。試算は鉄道総研開発の車両運動シミュレータ (VDS : Vehicle Dynamics Simulator) <sup>4)</sup>を用いて行った。列車の走行状態において、時々刻々変化する各軸位置に応じた高架橋天端の絶対変位波形を入力することで、各高架橋の線路直角方向の挙動の違いを考慮した。高架橋天端の絶対変位波形は、3. の動的解析における結果を用いた。解析対象領域を通過するタイミングを変えた 10 ケースを実施し、独立モデルと連続モデルで車両が脱線しない同一の振幅調整倍率を入力した場合の最大車輪上昇量と最大横圧値の比較を行った。

解析により得られた結果を図 11 (a), (b) に示す。超連続モデルでは、車両の振動により発生するレールからの車輪上昇量が独立モデルの 30%程度まで低減することが確認できる。また車輪フランジがレールに接触することにより発生する横圧値は独立モデルの 80%程度まで低減する。超連続基礎モデルで、いずれの指標値にも低減効果が見られ、基礎の超連続化により車両の走行安全性が向上していることを確認した。

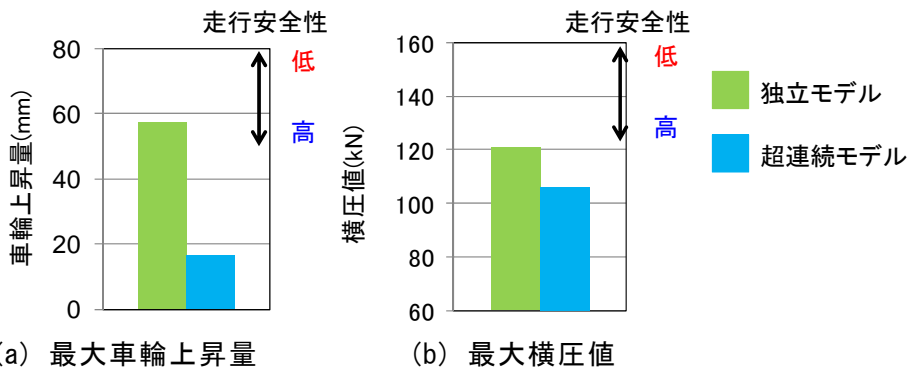


図11 直接基礎形式の超連続基礎高架橋における車両走行安全性解析結果

#### 4. まとめ

フーチング基礎を線路方向に連続した高架橋として、超連続基礎高架橋を提案し、基礎形式の異なる2つの構造物モデルの地震時挙動の把握および効果について示した。本構造では、フーチング基礎および高架橋天端位置での応答の一樣化効果や線路直角方向の角折れ量の低減効果がみられ、超連続基礎構造の有効性を確認した。また、各基礎形式で上部構造物の振動特性に以下のような特徴が見られる。

- ・ 杭基礎形式では、フーチング基礎の線路方向の回転が、連続化したフーチング基礎により拘束されるため、上部構造物の線路方向の振動特性が独立基礎モデルに比べ短周期化する。
- ・ 直接基礎形式では、フーチング基礎の底面積が独立基礎に比べて増加するため、フーチング基礎の回転量が抑えられる。この結果、高架橋天端位置での変位量が低減される。上部構造物は線路・線路直角方向ともに独立基礎モデルに比べ短周期化する。

最後に、直接基礎形式の超連続基礎高架橋における車両走行安全性の試算を行い、独立基礎高架橋に比べ最大車輪上昇量と最大横圧値が低減し、走行安全性が高まっていることを確認した。

**参考文献** 1) 曾我部正道ら：連続する鉄道構造物群の地震時車両走行性、鉄道力学論文集、No.13、pp.177-184、2009、2) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計、丸善、2012、3) 鉄道総合技術研究所：設計計算例 鉄筋コンクリート橋脚（杭基礎）、2001、4) 宮本岳史ら：地震時の鉄道車両の挙動解析、日本機械学会論文集（C編）、64巻、626号、pp.236-243、1998.