

# 超連続基礎を有する高架橋の提案と地震時挙動の解明

田中 浩平\* 室野 剛隆\*\* 飯田 浩平\*\*\*

Proposal of a Railway Viaduct with “Super-continuous” Foundation and Its Behavior During Earthquakes

Kohei TANAKA Yoshitaka MURONO Kohei IIDA

Railway structures are constructed linearly and continuously on the surface ground of which sedimentary structure in many cases varies greatly from site to site. As a result, the site-specific structural design is required and the cost for design and construction increases. In addition, angular bents and joint staggers at the boundaries between adjoining structures are generated, which adversely affects the train running safety during earthquakes. Therefore, we proposed a railway viaduct with “super-continuous” foundation, which is constructed by combining a series of foundations of multiple viaducts in the section from 100m to 1000m. The foundations thus combined move together during earthquakes, so it is expected that the variation of effective input motions to the structures becomes small. In this paper, it is verified by 3-dimensional dynamic analysis of the proposed viaduct that the variation of effective input motions becomes small and that the running safety of train is improved.

キーワード：超連続基礎，鉄道高架橋，耐震設計，危機耐性，車両走行安全性

## 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、各構造物位置での表層地盤構造は地点ごとに変動する。したがって、構造単位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現象が発生することが想定される。

表層地盤構造の変動により、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。また、高架橋の諸元が地点ごとに異なるために、構造物上に設置される電化柱や防音壁等の付帯構造物の応答も地点ごとに変動する。隣接する高架橋間では、地震増幅特性や高架橋の振動特性が異なることによる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>。

これらの現象が発生することを防ぐために、ある区間における表層地盤の変動に起因する有効入力動の変動を一様化するような構造形式として、複数の高架橋の基礎を線路方向に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）を提案した<sup>2)</sup>。基礎を連続化することにより、地震時に基礎が一体となって挙動するため、表層地盤の変動に起因する有効入力動の変動を一様化できる。

本報告では、基礎の連続化による有効入力動の一様化効果を、杭基礎形式および直接基礎形式の超連続基礎高

架橋において数値解析により確認した。また、基礎を連続化することにより、基礎上に構築した上部構造物の振動特性が、独立基礎高架橋と比較してどのように変化するかについて考察を行った。最後に、提案した構造物の車両運動シミュレーションを実施し、車両走行安全性の向上効果について評価を実施した。

## 2. 超連続基礎を有する高架橋の概要

超連続基礎は、これまで構造単位ごとに独立していた高架橋の基礎を連続的に繋げたものである。地震時には、この基礎が一体となって挙動することで、連続化した区間における基礎位置の有効入力動が一様化する。これにより、耐震設計の観点から以下に示す効果が期待できる（図1参照）。

- ・ 有効入力動が一様化され、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。
- ・ 連続する複数の高架橋で上部構造物天端における地震時応答が一様化されるため、構造物の境界部における目違いや角折れが減少し、車両の走行安全性が向上する。また境界部に跨って構築される防音壁等の付帯構造物に対する入力位相差が小さくなる。

\* 鉄道地震工学研究センター 地震動力学研究室

\*\* 鉄道地震工学研究センター

\*\*\* 鉄道力学研究部 車両力学研究室

特集：防災技術

- ・ 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、事前に想定されていない局所的な地震増幅にも一様化の効果が発揮される。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>3)</sup>の面においても優れている。
- ・ 独立基礎高架橋に比べて、地震動の大きな入力損失効果が期待でき、設計地震動が低減できる可能性がある。

また、超連続基礎高架橋は、耐震設計の観点以外に、以下に示す特徴を有している。

連続基礎では独立基礎に比べて、土工量とコンクリート量が増えるため、建設コストが増加する。そのため、適用にあたっては基礎構造や上部構造の合理化を併せた構造形式を検討することが重要となる。例えば、連続化したフーチング基礎の底面では、大きな支持力が期待できるため、地点によっては杭本数や杭長の低減、もしくは杭基礎を直接基礎に変更して、建設コストを低減できる可能性がある。また、杭と橋脚位置が近接することにより発生する基礎部の過密背筋を、杭位置をずらすことにより回避して施工性を改善できる。

長大コンクリートでは常時の伸長・収縮により基礎にひび割れが発生することが懸念される。この影響については桁を連続化した場合と比べて、温度変化が小さい地中に設置されていることから、ひび割れの発生可能性は低くなることが期待される。

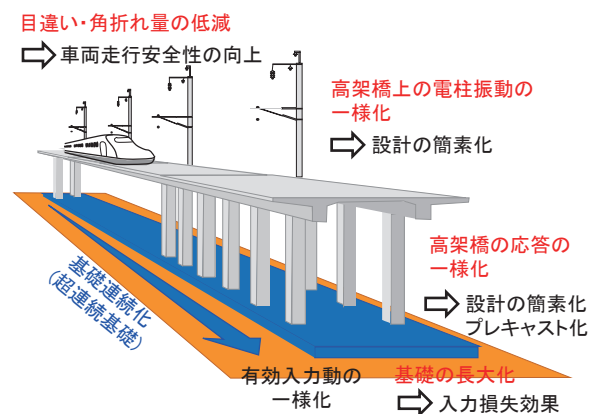


図1 超連続基礎高架橋の概要

### 3. 超連続基礎高架橋の地震時挙動の検討

#### 3.1 検討内容

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、有効入力動の一様化効果を確認するための数値解析を行った。また、

基礎を連続化することによる上部構造物の地震時挙動の変化について考察を行った。

#### 3.2 杭基礎形式の超連続基礎高架橋の検討

##### 3.2.1 解析モデル

杭基礎形式の超連続基礎高架橋における地震時挙動を3次元動的解析により評価する。想定する高架橋は図2に示す諸元のRC造単柱式高架橋とし<sup>4)</sup>、柱ごとに独立した基礎を有する高架橋モデル(独立モデル)を作成した。この独立モデルをフーチング基礎位置で5つ連続化した高架橋(図3)を超連続基礎高架橋モデル(超連続モデル)とした。連続化区間での表層地盤の変動を表現するために、各橋脚位置の地盤種別が図3のように異なるものとした。(第1,2,5橋脚：G4地盤，第3,4橋脚：G3地盤)。

解析モデルは、図3に示す梁・ばねモデルとし、上部構造物の挙動は橋脚基部に設定した回転ばね、基礎の挙動は基礎位置に設定したスウェイ・ロッキングの地盤ばねによりモデル化した。これらのばねの骨格曲線はプッシュオーバー解析の結果から評価し、地盤ばねは地盤種別ごとに異なるものを設定した。また本ケースは杭基礎形式であるため、フーチング底面における鉛直支持力および水平せん断力を考慮していない。なお、フーチング基礎側面には地盤のフーチング前面ばねを設置している。5橋脚を連続化したフーチングの梁は、図2に示す基礎諸元の剛性を有する弾性梁により表現した。

入力地震動は鉄道設計標準(耐震設計)<sup>3)</sup>における

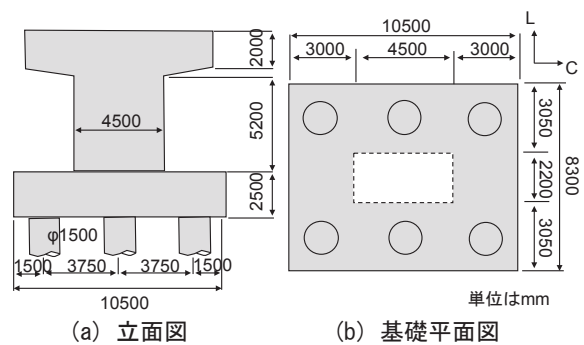


図2 構造物諸元(RC造単柱式高架橋)

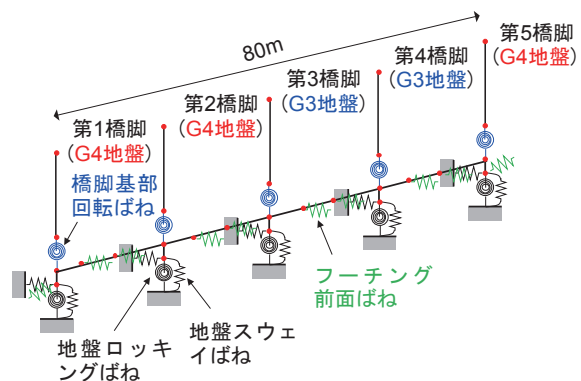


図3 杭基礎形式の超連続基礎モデル

スペクトルIIとし、地盤種別ごとに設定した地表面地震動を、基礎位置の地盤ばねを介してそれぞれ入力した。

### 3.2.2 有効入力動の一樣化効果

超連続モデルにおいて有効入力動が一樣化される効果について、独立モデルとの比較により確認する。3次元動的解析により得られたフーチング位置の最大応答値分布を図4に示す。線路方向の最大応答値は、加速度、変位ともに超連続モデルで一樣化していることが確認できる。また、その応答値は独立モデルにおける応答値の変動の範囲内に収まる。線路直角方向の応答値は、フーチング基礎が有限の剛性を有する弾性梁であるために、地盤種別に応じて緩やかに変動する。この変動は独立モデルの不連続な変動（例えば第2,3橋脚間）に比べると小さく、応答の変動を均す効果が確認できる。

フーチング基礎の位置の応答変位波形を比較したものを図5に示す。超連続モデルの結果については、5橋脚の結果を重ね書きしている。線路方向の変位波形は、超連続モデルの5橋脚で振幅レベル、位相特性ともにほとんど一致している。線路直角方向は、振幅レベルにばらつきが見られるものの、独立モデル(G3)、独立モデル(G4)の範囲内で変動している。

続いて、上部構造物の天端における応答の一樣化効果を確認する。図6に高架橋天端位置での最大応答値分布を示す。フーチング基礎位置の応答が一樣化されているため、これらの上部構造物の応答も当然のことながら一樣化する。一樣化した応答値について、図4の基礎位置と図6の上部構造物天端位置を比較した場合に、線路直角方向の独立、超連続モデルの大小関係は変わらない。しかし、線路方向については、上部構造物天端での超連続モデルの応答値が独立モデルに対して大きくなる。これには、上部構造物の塑性化が関係しており、詳細を以下に説明する。

高架橋天端位置の変位波形を比較したものを図7に示す。フーチング基礎位置と同様に、超連続モデルの変位波形は一樣化されているが、線路方向の超連続モデルおよび独立モデル(G3)地盤の第3,4橋脚で上部構造物が塑性化して残留変位が生じている。よって、図6の線路方向に見られるように、線路方向の一部の上部構造物は応答加速度が800gal弱で頭打ちし、変位量が相対的に大きくなる。その結果、線路方向の基礎位置の変位量に対して、上部構造物天端位置の変位量の大小関係が反転するような結果が得られた。

### 3.2.3 上部構造物の振動特性

連続化により上部構造物の振動特性が変化することについて議論する。図8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。超連続モデルでは、線路方向のばねがほとんど回転していない。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

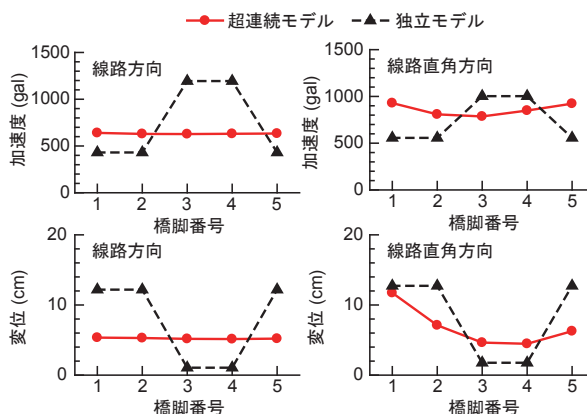


図4 最大応答値分布の比較（フーチング基礎位置）

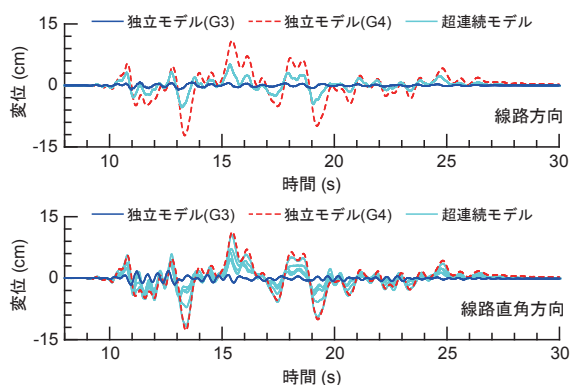


図5 応答変位波形の比較（フーチング基礎位置）

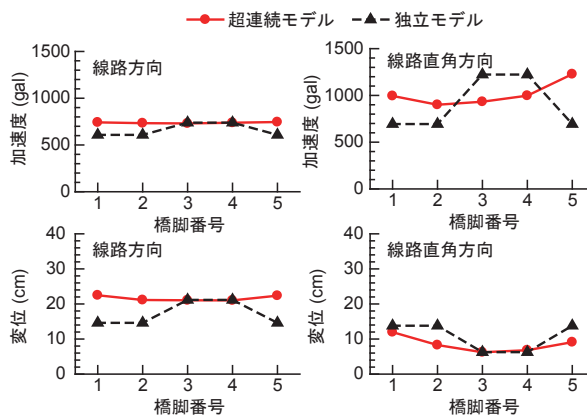


図6 最大応答値分布の比較（上部構造物天端位置）

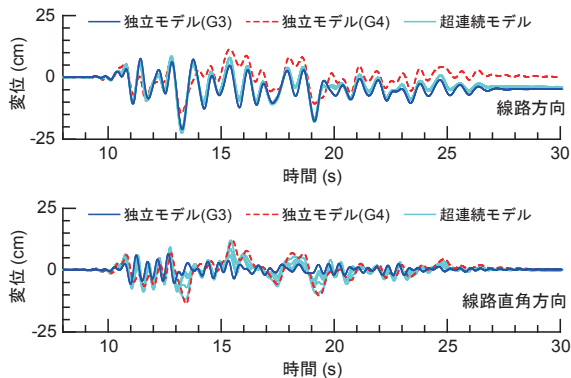


図7 応答変位波形の比較（上部構造物天端位置）

特集：防災技術

れることが原因である。これにより、線路方向の上部構造物は独立モデルと比べ短周期で応答する。つまり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、本検討のように独立モデルと同様の上部構造物を採用した場合には、独立モデルと比べて短周期化するため応答変位量が低減することが期待できるが、一方で降伏震度は変わらないため、図7に示したように上部構造物は塑性化しやすくなる。

線路直角方向については、図8に示すように地盤の回転ばねが独立モデルと同様に挙動する。これは、フーチング基礎の回転剛性により線路直角方向への回転挙動が拘束される効果がそれほど大きくないため、超連続モデルと独立モデルは比較的近い挙動となる。

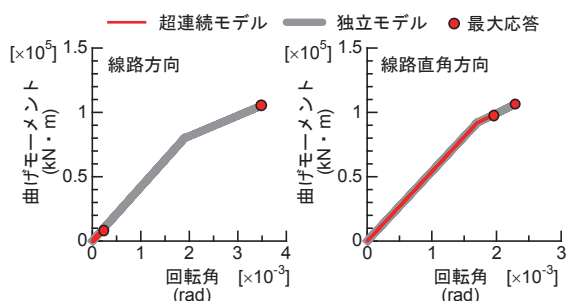
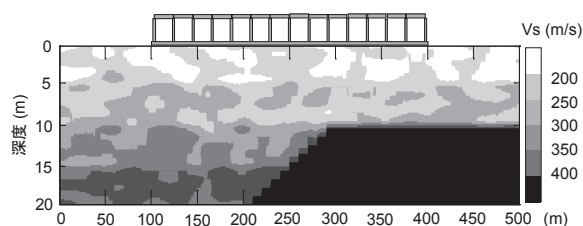


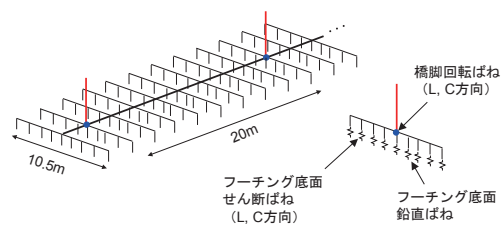
図8 地盤の回転ばねの挙動

化していることが確認できる。特に線路方向は一様化効果が高く、線路直角方向は地盤の変動に応じて緩やかに変動する。

なお、フーチング基礎位置の変位は、超連続モデルが独立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10で独立モデルの変位量が小さい地点（例えば160m地点）の地盤



(a) 地盤モデル



(b) 直接基礎形式の超連続基礎モデル

図9 解析モデル図

3.3 直接基礎形式の超連続基礎高架橋の検討

3.3.1 解析モデル

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評価を行った。解析モデルは、図9に示すように全長500m領域の地盤モデル上に300mの高架橋を設定している。地盤は、図9(a)に示すようにせん断弾性波速度Vsが400m/sとなる基盤の深さが変化し、表層のVsが不均質にばらついたモデルとした。図9(b)は構造物のモデル化を示す。超連続モデルは、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3.2の杭基礎形式と同様のものを用いた。直接基礎における地盤抵抗は分布ばねにより表現し、基礎幅を8分割してモデル化を行った。地盤抵抗は、図9(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種類を用いてモデル化している。このばねは、図9(a)に示すモデルの地表面における地盤諸元に応じて設定した。

3.3.2 有効入力動の一様化効果

直接基礎形式のモデルにおける3次元動的解析を実施し、有効入力動の一様化効果を確認する。図10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。フーチング基礎位置の加速度、変位は、超連続モデルで一様

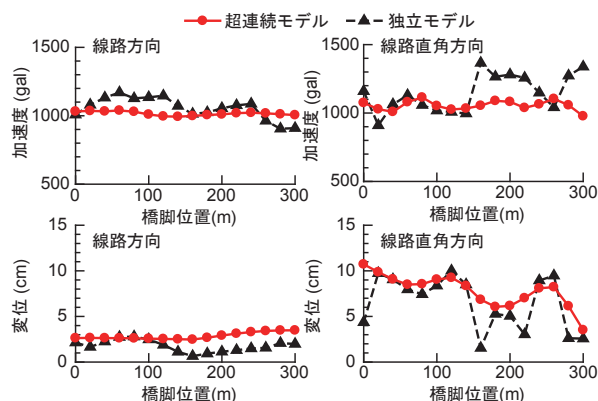


図10 最大応答値分布（フーチング基礎位置）

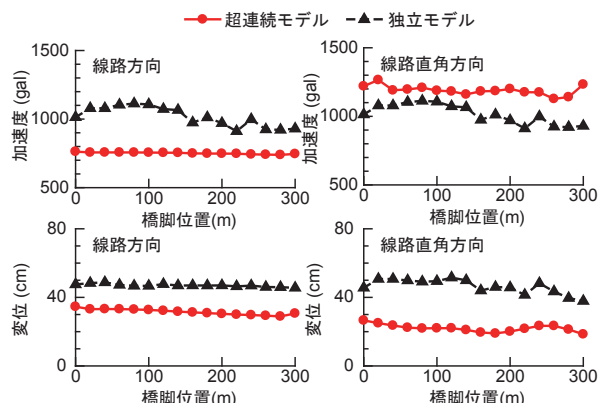


図11 最大応答値分布（上部構造物天端位置）

のせん断ばねは、超連続モデルの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ている。

図 11 に、各方向の高架橋天端位置の最大応答値分布を示す。高架橋天端の応答値も一様化されていることが確認できる。この応答値は、フーチング基礎で一様化された有効入力動の周波数特性、上部構造物の振動特性、塑性化程度に応じて、独立モデルの応答値との大小関係が変化する。線路方向は、3.2.3 項と同様に橋脚基部の回転ばねが塑性域に入っており、加速度応答値が頭打ちしている。変位量から分かるように、塑性化程度は全橋脚で同様である。

線路直角方向は、上部構造物は弾性域であるが、図 10 に示した基礎位置では、独立モデルと超連続モデルの応答値の相対的な大小関係は異なっており、上部構造物天端での応答加速度が大きくなり、応答変位が小さくなる。これも 3.2.3 項の線路方向と同様に、上部構造物の振動特性が変化したことが関係しており、詳細は 3.3.3 項において考察する。

### 3.3.3 上部構造物の振動特性

図 12 に線路直角方向のフーチング基礎位置の最大回転角を示す。独立モデルに比べて、超連続モデルで基礎の回転量が小さくなる。その結果、図 11 に示した直角方向の変位量は超連続モデルで小さくなる。これは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 13 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。超連続モデルでは、いずれの方向にも基礎が回転しないことが確認できる。これは、超連続モデルでの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。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、上部構造物は独立モデルに比べて短周期で応答する。

最後に、図 14 に各橋脚位置における最大角折れ量を示す。図 11 に示したように、上部構造物の応答変位は一様化され、変位量も小さくなるため、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。これにより、車両の走行安全性が向上することが期待できる。

## 4. 車両走行安全性の向上効果の検討

### 4.1 概要

3.3 節で作成した 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<sup>5)</sup>を用いて行った。このプログラムによる解析については、実台車を用

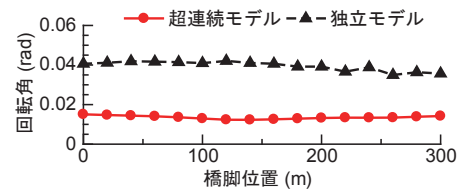


図 12 最大回転角 (基礎位置, 線路直角方向)

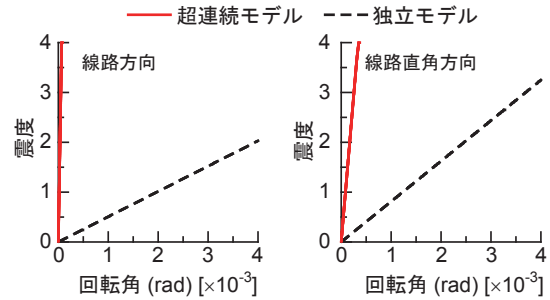


図 13 基礎位置の回転量と震度の関係

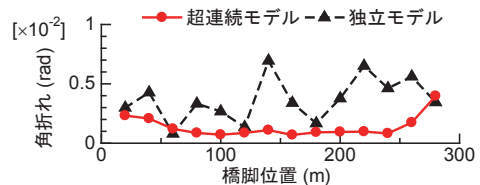


図 14 最大角折れ分布

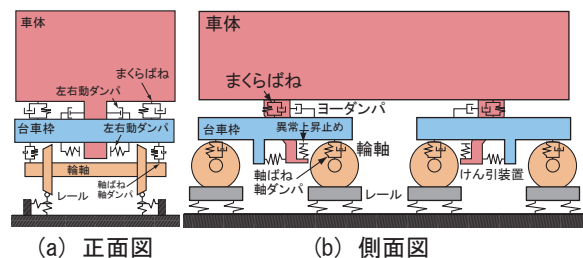


図 15 走行シミュレーションにおける車両モデル

いた加振実験による精度の検証も行われている<sup>6)</sup>。

走行シミュレーションにおける車両モデルを図 15 に示す。車両は鉄道設計標準 (変位制限)<sup>7)</sup>における走行安全性解析で用いた高速新幹線車両 (ボルスタレス台車装備) とした。乗車条件は定員乗車条件とし、走行速度は 260km/h で一定とした。

軌道面における振動は各輪軸直下のレール支持部に変位波形で与えた。この波形は、3.3 節の動的解析における高架橋天端の絶対変位波形とした。本研究では、解析対象である 300m の高架橋区間を走り抜ける 4 秒間程度の車両挙動を評価しており、図 15 に示す各輪軸直下に時々刻々変化する各高架橋位置の応答波形を入力している。また、解析領域を通過するタイミングによるシミュレーション結果の変動を確認するために、車両走行開始点を 2m 刻みで変化させた 10 ケースのシミュレーションを実施した。

特集：防災技術

4.2 シミュレーション結果

シミュレーションにより得られた結果を図16に示す。車両の走行安全性は、地震動により車両が振動応答することによる車輪のレールからの跳び上がり量（車輪上昇量）と、主に車輪フランジがレールゲージコーナ部と接触することに起因する横圧値から判断することとし、これらの値が大きくなるほど安全性が低いと判断できる。

図16(a)、(b)のいずれの結果も、走行タイミングの異なるケースごとの結果に変動があまり見られないことから、タイミングに左右されない一般的な傾向であることがわかる。

図16(a)から、超連続モデルの車輪上昇量最大値が独立モデルの1/3程度まで低減することが確認できる。また、図16(b)から横圧値最大値は独立モデルの4/5程度まで低減する。超連続モデルで、いずれの指標値にも低減効果が見られることから、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。

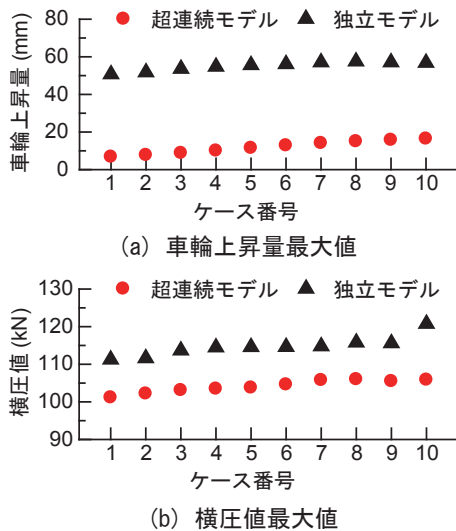


図16 車両走行安全性解析結果

5. 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つの構造物モデルによる数値解析から、有効入力動の一様化効果について確認した。これに伴い、同一の構造諸元を有する上部構造物の応答値が一様化されることを確認した。また、基礎の連続化による上部構造物の振動特性について、独立基礎形式の基礎と比較した場合に、以下のような特徴が見られることを確認した。

- 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の剛性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モデルに比べて短周期化する。

- 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。

また、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向上効果を確認し、以下の知見を得た。

- 3次元動的解析の高架橋天端における応答波形から、橋脚位置での最大角折れ量を評価し、独立モデルと比較して低減していることを確認した。
- 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、独立モデルに比べ最大車輪上昇量と最大横圧値が低減し、車両の走行安全性が向上していることを確認した。

今後は、実設計への適用を目指した試設計を実施し、設計法の確立における課題の抽出・整理を行う。また、連続化による入力損失効果等についても定量的な確認を行う。

文献

- 1) 曾我部正道, 原田和洋, 浅沼潔, 丸山直樹, 渡辺勉: 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) 田中浩平, 室野剛隆: 超連続基礎を有する高架橋の提案とその効果確認の検討, 第17回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, pp.37-42, 2014
- 3) 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
- 4) 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
- 5) 宮本岳史, 石井弘明, 松尾雅樹: 地震時の鉄道車両の挙動解析: 上下, 左右に振動する軌道上の車両運動シミュレーション, 日本機会学会論文集(C編), 64巻, 626号, pp.236-243, 1998
- 6) 宮本岳史, 松本信之, 曾我部正道, 下村隆行, 西山幸夫, 松尾雅樹: 大変位軌道振動による実物大鉄道車両の加振実験, 機論C編, 71巻, 706号, pp.1849-1855, 2005
- 7) 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説 変位制限, 2006