

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

田中 浩平¹・室野 剛隆²

¹正会員 博士（工学） （公財）鉄道総合技術研究所 鉄道地震工学研究センター（〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38）

²正会員 博士（工学） （公財）鉄道総合技術研究所 鉄道地震工学研究センター（〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38）

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、地点ごとに表層地盤構造は大きく変動する。これに伴い、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、以下に示すような課題が生ずる。

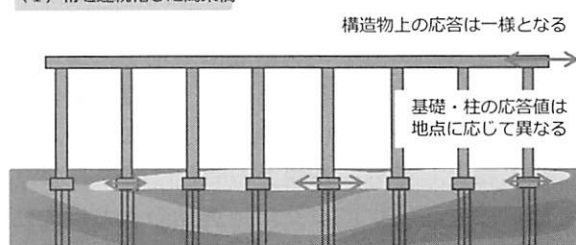
- ① 地点ごとに地震動の増幅特性が異なるために、各ボーリング箇所設計地震動が変化し、地点依存の設計が必要となる。これにより、設計・施工コストが増大する。また、上部構造のプレキャスト化の阻害要因となる。
- ② 構造物上に設置される電化柱や防音壁等の付帯構造物の被害を防ぐためには、各構造物の応答特性に配慮する必要がある。地点ごとに構造物が異なる場合は、その特性を考慮した上で付帯構造物の設計が必要である。
- ③ 線路直角方向にも独立に応答するため、隣接構造物間に大きな相対変位や角折れが発生する。これは、鉄道等の車両の走行安全性にとって悪影響を及ぼす¹⁾。
- ④ 実際の設計では、地盤調査箇所が限られるため、ボーリング調査区間では、同様の地盤が続いていると仮定した上で設計地震動を設定する。よって、表層地盤の局所的な変化が必ずしも事前に把握できるとは限らず、構造物に、設計で想定した以上の地震動が入力する可能性がある。

これまでに、特に③の課題を解決することを目的として、桁を連続化する構造物が構築されている²⁾。しかし、この場合には構造物天端での応答が一様化されるが、入力する地震動は地点ごとに変化するため、一部の柱に局所的な応力が発生する可能性が否定出来ない（図-1 上）。また、桁は外気にさらさ

れているため、常時でも、温度変化や乾燥収縮により柱に力が作用し、ひび割れの発生が指摘されている²⁾。

①～④の課題を全て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」を有する高架橋を提案する。地震時には、連続化した基礎が一体となって挙動するため、上部構造への有効入力動は、基礎位置によらず、一様化される。これにより、地点ごとに变化する表層地盤構造に依存せず、基礎上に同一の上部構造を構築することが可能になる。また、同一の構造物への有効入力動が一様化するため、構造物上の応答値は同一となる（図-1 下）。このように、桁を連続化した高架橋とフーチング基礎を連続化した高架橋は、構造物全体を一体化するという点では、同様の対策であるが、地震時の構造物応答において得られる効果が大きく異なっている。

(1) 桁を連続化した高架橋



(2) フーチング基礎を連続化した高架橋

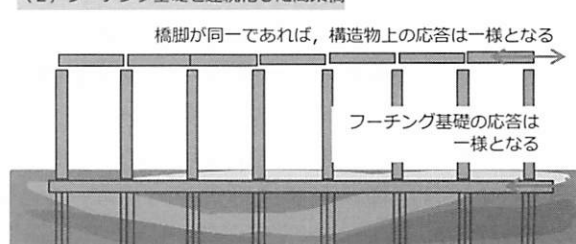


図-1 連続化箇所による効果の違い

本論文では、超連続基礎を有する高架橋の基本的な概念と、2次元有限要素法による効果確認を実施した結果を示す。

2. 超連続基礎を有する高架橋の利点

連続化したフーチング基礎が一体となって挙動することにより、連続化した区間の基礎位置の有効入力動が一様化される効果が期待できる。このような超連続基礎を採用することで、下記に示すような利点が得られる。

- ① 有効入力動が一様化されることにより、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。また、上部構造のプレキャスト化が容易となり、施工性および品質の向上が期待できる。
- ② 上部構造への有効入力動の一様化により、隣接する構造物間の線路直角方向の挙動が一様となるため、相対変位や角折れが減少し、鉄道等の車両走行安全性が向上する。
- ③ 連続化したフーチング基礎下面の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。
- ④ 現状の耐震設計では、詳細な地盤調査が実施される箇所は限られており、地盤調査が実施されていない地点で、局所的に大きな地震動が入力する可能性が否定出来ない。一方で、超連続基礎を有する高架橋では、このような局所的な有効入力動が超連続基礎により一様化する効果が期待される。以上より、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」の面から優れた構造物である³⁾。
- ⑤ 連続化したフーチング基礎は、地中に構築されるため、桁を連続したものよりも温度変化が小さく、基礎や柱にひび割れが生じにくい。また生じたとしても、外観上の問題は発生しない。
- ⑥ 基礎の超連続化により、地震動の入力損失効果が期待でき、独立基礎に比べて設計地震動が低減できる可能性がある。

超連続基礎上に構築される構造物や基礎形式に制約はなく、適切な剛性を有するフーチング基礎を線路方向に連続して構築することが条件となる。よって、一般的な杭基礎の桁式高架橋以外にも、例えば、図-2に示すような様々な構造形式のバリエーションが考えられる。

(a)は、摩擦杭を採用したパイルドラフト基礎の高架橋である。基盤支持の杭基礎でなく、摩擦杭を採用することにより、長大なフーチング基礎下面の大きな鉛直支持力を活かすことができる。これにより、杭長や杭本数の低減が可能となる。(b)は背割りのラーメン高架橋を超連続化したものである。桁の支承部を省略できるため、メンテナンスコストを低減できる。フーチング基礎を連続化することで、杭配置の自由度が増すため、(c)に挙げるような柱直下に杭を配さない構造物を採用できる。これにより、基礎部分の過密配筋を避ける事ができる。最後に、(d)の地盤改良等により支持力を確保することにより、直接基礎化した高架橋である。長大なフーチング基礎が一体となって挙動し、杭頭に大きなせん断力・モーメントが発生するため、基礎の設計に十分な配慮が必要である。これを避けるために、直接基礎化する。鉛直支持力は、比較的硬い地盤であれば、フーチング基礎の底面で確保できるが、柔らかい地盤であれば、地盤改良体や杭頭を切った群杭等で確保する。また、直接基礎化により、自己免震効果が確認されていることから⁴⁾、構造物応答の頭打ちが望める。

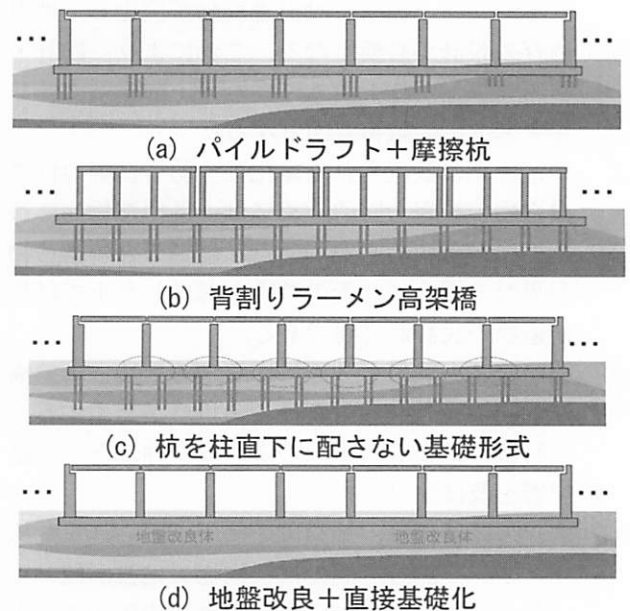


図-2 超連続基礎を有する高架橋のバリエーション

3. 解析モデル

超連続基礎を有する高架橋では、適切な剛性を有する基礎を線路方向に連続することで、フーチング基礎が一体と挙動することにより、上部構造への有効入力動が一様化される。ここでは、この効果について、2次元有限要素法解析により確認する。表層地盤は実地盤を模擬した図-3に示すモデルを作成し

た．構造物は，単柱橋脚の桁式高架橋を梁でモデル化し，線路方向の時刻歴応答解析を実施した．

(1) 地盤モデル

解析対象とした地盤モデルを図-3に示す．基盤が傾斜する地盤モデル（傾斜地盤モデル）であり，基盤までの深さは，最も深い位置でいずれも30m程度である．

各地盤のせん断弾性波速度(V_s)は，図-3に示すように与えた．各地盤要素の非線形特性は，GHE-Sモデル⁵⁾でモデル化し，各層でのパラメータは，砂質土と粘性土の区別から，表-1に示す標準パラメータにより与えた⁶⁾．また，基準ひずみ γ_r については，土の上載圧は考慮せず，各物性に応じて表-1のように設定した．

(2) 構造物モデル

構造物の基礎諸元を図-4に示す．フーチング基礎は，厚さ3.0m×幅8.0mの断面で，9本の杭を有する．杭径は1.0mである．柱の断面は1.5×4.0mである．

構造物全体のモデルを図-4に示す．橋脚間隔は20mとし，500m区間（モデル左端から100～600mの区間）に25本の橋脚を設定した．柱高さは，8.0mであり，それぞれの橋脚の固有周期が0.9秒程度になるように頂部に集中質量を付加している．なお，桁を介しての隣接橋脚の影響はここでは無視している．杭は基盤（ $V_s=700\text{m/s}$ ）に1メッシュ分入る長さとし，地点に応じて異なる．各構造部材の諸元は表-2に示す通りである．これらの諸元は，文献⁷⁾を参照し設定した．なお，柱，杭，フーチング基礎は梁でモデル化し，線形部材とした．

超連続基礎を有する高架橋の結果と比較を行うために，独立基礎の高架橋の解析も併せて実施した．これは，図-4の全体モデルから各基礎を繋ぐ梁（フーチング基礎部分）を全て取り除いたものである．なお，本検討は有効入力動の効果確認のための簡易解析であり，杭の引き抜き・押し込み効果を表現する回転ばねは，いずれのケースも設置していない．

(3) その他

地盤モデルの境界条件は，側方にはモデル端の地盤をそのまま延長した自由地盤を接続した．底面は粘性境界とした．なお，本解析は解析地盤の奥行き方向にも自由地盤を設置し，解析地盤と自由地盤を線路方向のせん断ばねで繋ぐことにより，3次元効果を擬似的に導入する手法によって評価しているが，その詳細については，文献⁸⁾を参照されたい．

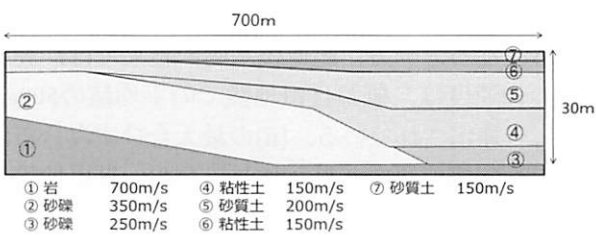


図-3 地盤モデル（傾斜地盤モデル，溺れ谷モデル）

表-1 地盤の非線形特性

	$C_1(0)$	$C_2(0)$	$C_1(\infty)$	$C_2(\infty)$	α	β
砂質土	1.0	0.83	0.17	2.5	2.86	3.229
粘性土	1.0	0.83	0.17	2.5	2.86	3.229
	h_{max}	κ	$\gamma_{r,0}$	G_{min}/G_{max}	γ_r	
砂質土	0.21	1.31	0.0015	0.35	0.0005	
粘性土	0.16	1.29	0.0130	0.10	0.001	

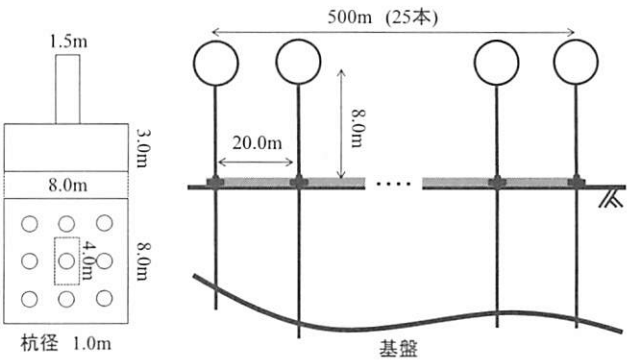


図-4 基礎諸元と構造物全体モデル

表-2 各構造部材の諸元

部材	断面積 $A \text{ (m}^2\text{)}$	断面2次 モーメント $I \text{ (m}^4\text{)}$	ヤング率E (kN/m^2)	単位体積 重量 γ (tf/m^3)	杭径D (m)	杭本数 n
構造躯体	6.0	0.281	$2.24 \cdot 10^7$	2.5	-	-
杭	0.785	0.0491	$2.24 \cdot 10^7$	2.5	1.0	9
フーチング	24.0	128	$2.24 \cdot 10^7$	2.5	-	-

非線形動的解析を実施する上での解析手順は，以下のとおりである．はじめに構造物を取り除いた状態で自重解析を実施した．このとき，底面は固定境界，側方は鉛直ローラーとした．続いて，自重時の応力を引き継いで，非線形解析を実施した．

入力地震動は，鉄道構造物耐震標準³⁾におけるL2地震動のスペクトルIIとし，G1地盤($V_s=400\text{m/s}$ 相当)のものを基盤に入力した．

4. 解析結果

解析結果を以下に示す．

(1) 地盤の最大値分布

解析により得られた地盤の最大値分布を図-5に示す．(i)は最大加速度分布，(ii)は最大合ひずみ分布を示している．なお，比較のために，構造物を除外した自由地盤での結果を合わせて示している．(i)の最大加速度は，自由地盤の表層位置で，構造物のある区間では，300～700gal程度の範囲で変化しているこ

とが確認できる。基盤が深くなるほど、最大加速度は小さくなる。一方、超連続基礎の結果では、表層付近の加速度は、概ね自由地盤での平均値の500gal程度に一樣化されている。(ii)の最大合ひずみ分布についても同様の傾向が得られた。なお、自由地盤では、 $V_s=350\text{m/s}$ の砂礫層と $V_s=150\text{m/s}$ の粘性土の境界付近(図内白点線部分)で大きくなるが、構造物を考慮した解析では、杭の拘束効果により地盤のひずみ量が低減している。

(2) 橋脚およびフーチング基礎の応答

図-6に橋脚天端およびフーチング基礎位置での最大相対変位と最大加速度を示す。相対変位は、モデル最下面を基準とした変位である。超連続基礎のフーチング基礎位置での応答は、概ね独立基礎の平均値付近に一樣化されることが確認できる。また、これにより、橋脚天端の応答は一樣化されている。なお、一樣化した応答値と独立基礎モデルの応答値との大小関係については、後述する。

図-7にフーチング基礎位置の伝達関数を示す。これは、フーチング基礎位置のフーリエスペクトルをその地点の地表面波形のフーリエスペクトルで除したものである。超連続基礎モデルの伝達関数は、周期0.1~0.5秒の短周期領域で1を下回る傾向がみられる。この傾向は、独立基礎モデルではみられないため、基礎が長大化したことによる入力損失効果が表れているといえる。

一方で、周期0.5~1.0秒では、400~600m地点の、軟弱な地盤で1.0を超える応答倍率となった。これは、地表面波形のフーリエスペクトルが地点ごとに異なることが原因である。フーチング基礎位置のフーリエスペクトルは、5地点の平均的な値となる。一方で、地表面波形のフーリエスペクトルは、100~300m地点の硬質地盤で大きく、400~600mの軟弱地盤で小さくなる。よって、フーチング基礎位置の伝達関数を評価すると、軟弱地盤位置で1.0倍を超える応答倍率となる。この倍率の程度については、連続化する区間の地盤構造に依存するため、一般的な結論を得るためには、さらなる検討が必要である。

図-8に橋脚天端位置の伝達関数を示す。超連続基礎モデルの卓越周期は1.0秒付近にあるが、独立基礎モデルはそれより長く、1.6秒程度になる。これは、超連続基礎において、フーチング基礎により、橋脚の基礎位置での回転が拘束される効果といえる。

図-9にフーチング基礎位置の波形の加速度応答スペクトルを示す。図-6の右図では、いずれの地点でも、構造物天端の最大加速度は、独立基礎に比べ、超連続基礎で大きくなった。しかし、超連続基礎の

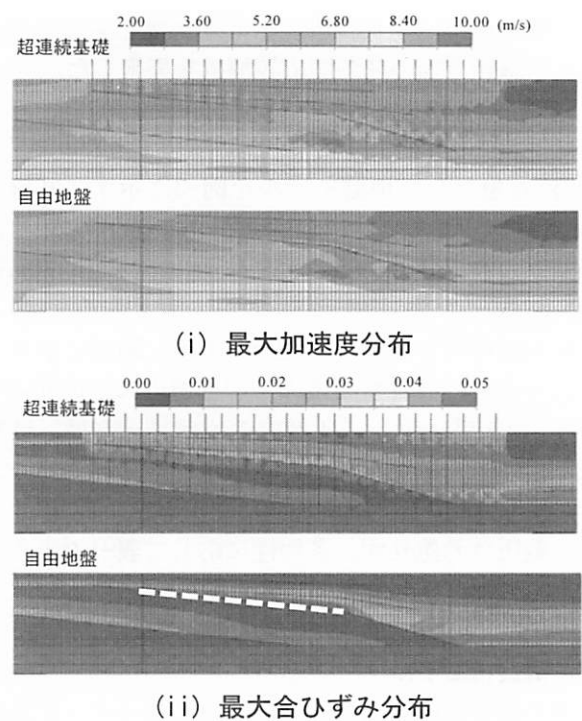


図-5 地盤最大値分布(傾斜地盤モデル)

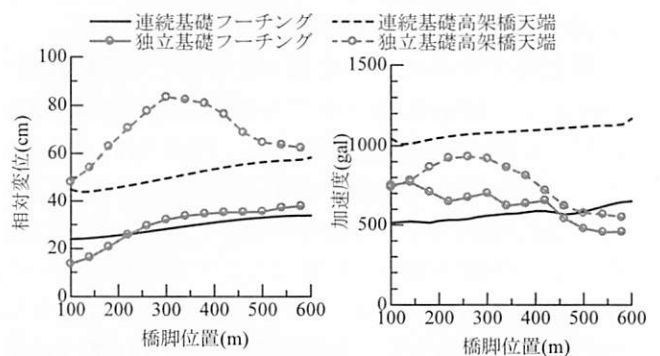


図-6 応答波形の最大値分布(傾斜地盤モデル)

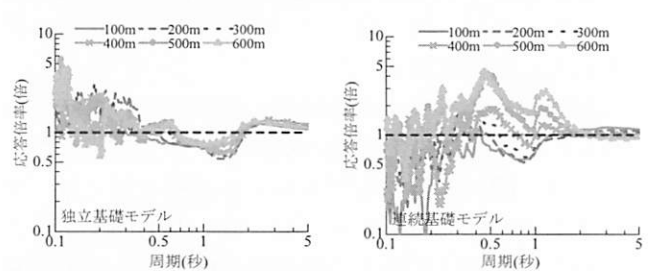


図-7 フーチング基礎位置の伝達関数(フーチング基礎/地表面、傾斜地盤モデル)

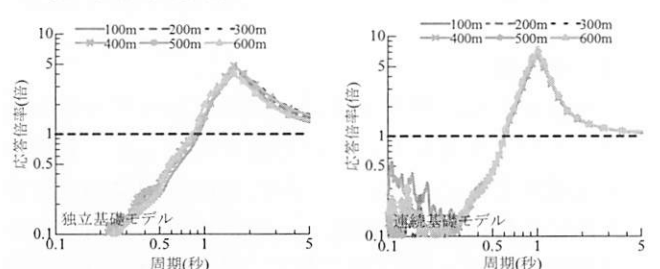


図-8 橋脚天端位置の伝達関数(橋脚天端/フーチング基礎、傾斜地盤モデル)

フーチング位置での最大加速度は平均化されており、場所によっては独立モデルより小さくなる部分もある（例えば500-600mの区間）。図-6の右図の橋脚天端位置の応答加速度は、このような地点でも、超連続基礎の方が大きくなっている。応答倍率も全周期帯で大きくなり、これは、図-8の伝達関数のピーク倍率の結果とも調和的である。

このような結果になった原因の1つに、橋脚の固有周期が、独立モデルと超連続モデルで異なり、超連続モデルで短くなっていることが挙げられる。図-9ではそれぞれの橋脚の固有周期の位置を、点線で示している。加速度応答スペクトルは長周期領域では、ピークに向かって大きくなる傾向が見られるため、短周期の超連続基礎モデルの橋脚は、独立基礎より大きな加速度応答となる。また、変位については、逆の傾向となっている。この結果は、同様の構造物を橋脚として構築した場合であっても、超連続基礎の場合には、フーチング基礎の影響により、橋脚の周期が変化するため、フーチング基礎位置での波形の周波数特性によっては、橋脚天端での応答値が異なる可能性があることを示唆している。

図-9の加速度応答スペクトルが示すように、超連続基礎では、独立基礎に比べ、ピークが明瞭にみられる。また、その値は、全地点での上限値に近い値となる。この傾向が一般的なものであるかについては、さらなる検討が必要である。

(3) 杭の応答値分布

図-10の(i)に杭の最大せん断力分布、(ii)に最大曲げモーメント分布を示す。超連続基礎を有する高架橋では、いずれの地点でも、杭頭付近に大きなせん断力、曲げモーメントが発生する。これは、独立基礎モデルではみられていないため、フーチングの長大化により、杭頭の発生応力が全体的に大きくなっている。

杭の応力分布から、超連続基礎の杭では、杭頭を強く拘束されるため、スウェイ振動が卓越し、杭頭で大きな曲げモーメントが発生していることがわかる。これに対し、独立基礎の杭では、これにロッキング振動が含まれるため、応力分布が、超連続基礎とは大きく異なる。

また、これらの応答値は、基盤の浅い硬質な地盤（モデル左側）で、相対的に大きくなる。図-6の左図では、硬質地盤位置（100～200m）で、超連続基礎の相対変位が、独立基礎の場合に比べて大きくなっていることがわかる。つまり、フーチング基礎を繋いだことで、この地点の杭が強制的に変位してお

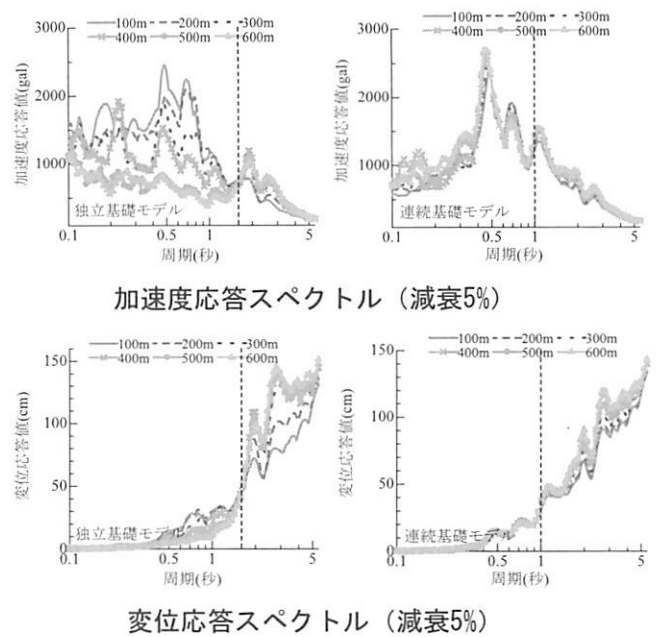


図-9 フーチング基礎位置の波形の応答スペクトル（傾斜地盤モデル）

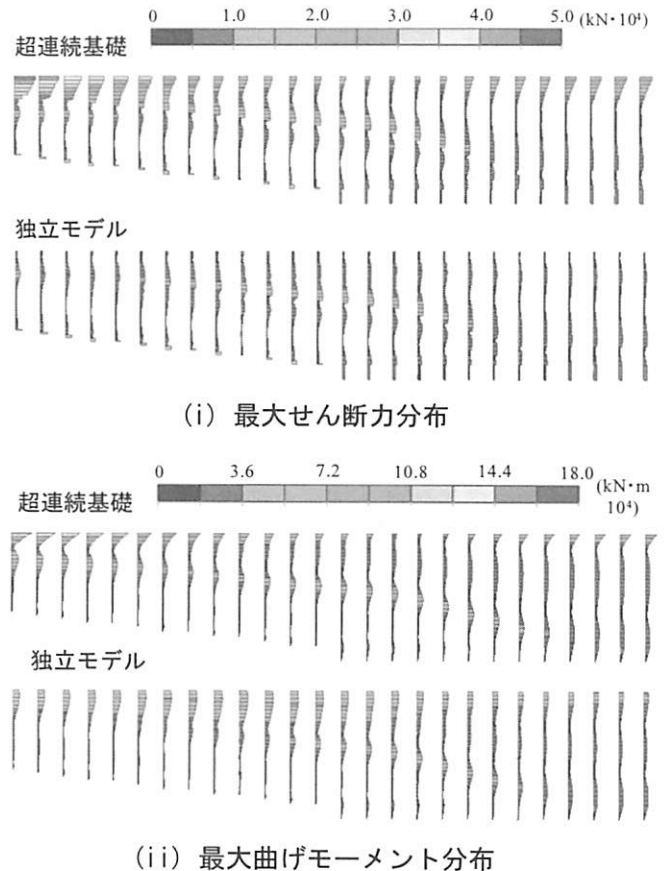


図-10 杭の応答値分布（傾斜地盤モデル）

り、発生する応力も大きくなっている。

連続化したフーチング基礎は一体となって挙動するため、それに追従する各杭の応答は、杭径や長さ、地盤条件によって大きく変化する。

5. まとめ

本論文では、超連続基礎を有する高架橋を提案し、既往の独立基礎高架橋、桁を連続した高架橋との違いを述べた。また、超連続基礎化することの利点について整理した。

続いて、提案した超連続基礎高架橋において、橋脚への有効入力動が一様化される効果を確認するために、実地盤を模擬した地盤モデルにおいて、線路方向の2次元有限要素法解析を実施した。その結果、超連続基礎の効果および独立基礎の応答と大きく異なる点について、以下に示す知見を得た。

- ・ フーチング基礎位置および橋脚天端位置での波形の最大加速度、最大相対変位は概ね一様化され、超連続基礎高架橋の効果が確認された。
- ・ 橋脚天端位置の伝達関数（橋脚天端位置のフーリエスペクトル／フーチング基礎位置のフーリエスペクトル）から、超連続基礎の橋脚は、独立基礎と同一の橋脚であっても、固有周期が短く、応答倍率が大きくなることがわかった。これは、超連続基礎モデルで、フーチング基礎が橋脚の回転を拘束する効果があるためである。
- ・ 同一の橋脚であっても、固有周期が変わるため、独立基礎モデルと超連続基礎モデルの橋脚天端での応答値の大小関係は、地震動の周波数特性に影響を受ける。
- ・ 杭頭の応答値は、いずれの位置でも、超連続基礎モデルで大きな値となった。これは、フーチング基礎が、独立基礎に比べ、大きくなったからである。
- ・ 杭頭の応答値は、硬質な地盤の杭で相対的に大きくなった。これは、フーチングを繋いだことで、硬質な地盤の杭が強制的に変位しており、

発生する応力も大きくなるからである。

今後は、本検討で明らかとなった独立基礎の応答と異なる部分について、超連続基礎を有する高架橋に適切な構造形式や基礎形式の検討を行う。また、線路直角方向の一様化効果について確認を行う。さらには、有効入力動の一様化効果を発揮するために必要なフーチング基礎の剛性等について、パラメトリックスタディーを実施する予定である。

参考文献

- 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) 大平拓也，谷健史，斉藤隆：50径間連続RCラーメン高架橋の設計・施工—阿佐線・赤野高架橋—，コンクリート工学，Vol.21，No.6，pp.36-43，1983.6
- 3) 鉄道総研：鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計，2011，丸善
- 4) 川島一彦，細入圭介：直接基礎のロッキング振動が橋脚の非線形地震応答に及ぼす影響，土木学会論文集，No.703/I-59，pp.97-111，2002.4
- 5) 室野剛隆，野上雄太：S字型の履歴曲線の形状を考慮した土の応力～ひずみ関係，第12回日本地震工学シンポジウム
- 6) 室野剛隆，野上雄太：S字型履歴曲線を有する土の非線形モデルとその標準パラメータの設定，土木学会地震工学研究発表会論文集，Vol.30，論文No.2-0014，2009.
- 7) 鉄道総研：設計計算例 鉄筋コンクリート橋脚（杭基礎）
- 8) 馬淵倉一，室野剛隆，田中浩平：奥行方向にせん断ばねで結合した自由地盤による地盤の3次元効果導入に関する検討，第69回年次学術講演会，2014（投稿中）