

道路橋杭基礎における地震動の入力損失効果の基礎的検討

中尾吉宏¹・片岡正次郎²

¹非会員 工修 国土技術政策総合研究所道路地震防災研究室 主任研究官（〒305-0804 つくば市旭1）

²正会員 工博 国土技術政策総合研究所道路地震防災研究室 室長（〒305-0804 つくば市旭1）

1. はじめに

平成23年東北地方太平洋沖地震では、大きな加速度振幅をもつ強震記録が多数得られているが、そのような記録が得られた観測点の周辺では必ずしも大きな被害は報告されておらず、その原因として、耐震補強が進められてきたこと¹、多くの強震記録では周期0.5秒以下の短周期が卓越し一般的な建物等構造物の被害に影響の大きい1秒程度の地震動が小さかったこと²が指摘されている。一方、壁式橋脚を有する橋梁の橋軸直角方向や橋台の応答のように、地震動の短周期成分の影響が大きい場合も存在すると考えられるが、東北地方太平洋沖地震で観測されたきわめて振幅の大きい短周期地震動が原因で大きな損傷に至ったという報告もなされていない。

地震動の短周期成分の影響が小さい原因の一つとしては、そうした地震動がそもそも構造物にそのまま作用しているわけではないこと、すなわち、地震動の入力損失の影響が考えられ³、数値解析による検討⁴も進められている。また、入力損失が大きくなれば、高架橋のフーチング頂部の揺れと周辺の地表面の揺れに差異が生じることから、フーチング上とその周辺の地表面で観測された地震動のスペクトル比に着目した検討がなされており、スペクトル比は周期0.5秒以下の短周期で地震によるばらつきが大きい⁵が、複数の地震の平均を取ると0.5倍程度まで低減する⁶ことが報告されている。更に同報告では、このような現象を再現できる高架橋の構造と周辺地盤のモデルの解析により入力損失の検討を行う中で、その解析結果が杭基礎の入力損失効果のモデル⁴と同様の傾向を示すこと等が示されている。

本稿では、上記報告⁵で対象とされた曾波神高架橋（石巻市）の構造と周辺地盤を対象に、強震記録への考察や地震応答解析を更に行うことによって、地震動特性と入力損失の関係や、地盤モデルと入力損失の関係について基礎的検討を行った結果を報告する。

2. 地震動特性と入力損失

(1) 地震動の周期特性

国道45号曾波神高架橋では、杭基礎のフーチング頂部と周辺の地表面等で強震観測を実施している。ここでは、中小地震の際に杭基礎フーチング上とその周辺の地表面において観測された強震記録に基づき、地震動の周期特性と入力損失の関係を考察する。

既往の中小地震の際に、曾波神高架橋周辺の地表面で観測された地震動の加速度応答スペクトルを図-1に示す。また、入力損失が大きくなれば差異が生じると考えられるフーチング頂部の揺れと周辺の地表面の地震動のスペクトル比（フーチング頂部／フーチング周辺の地表面）も示している。図-1から、中小地震による地震動の加速度応答スペクトルの最大値は何れも50～100gal程度の範囲に入る。同図(a)に示した2012年12月29日宮城県沖地震による地表面の地震動は、加速度応答スペクトルが概ねフラットな領域が固有周期0.7秒程度までであるのに対し、同図(b)の2013年2月2日十勝沖地震の地表面における地震動については、加速度応答スペクトルが概ねフラットとなる領域が固有周期1.5秒程度まで伸びている。また、同図(c)の2013年2月13日宮城県沖地震の地表面における地震動については、加速度応答スペクトルが短い固有周期で卓越している。

このように、地表面における地震動は地震により異なる周期特性を持つが、図-1から、フーチング頂部の揺れと周辺の地表面における地震動のスペクトル比については、地震や周期によるばらつきはあるものの、何れも周期0.6秒程度以上で概ね1前後となる。また、周期0.6秒程度から短い周期で小さくなり、0.2秒以下で0.5程度を中心にばらつく。地表面で観測された地震動には地震による周期特性の違いが認められたが、ここで考慮した地震動のレベルや周期特性の範囲では、フーチング頂部の揺れと周辺の地表面における地震動のスペクトル比は同様の特徴を有しており、地震動の周期特性により入力損失の効果が大きく変わる傾向は認められない。

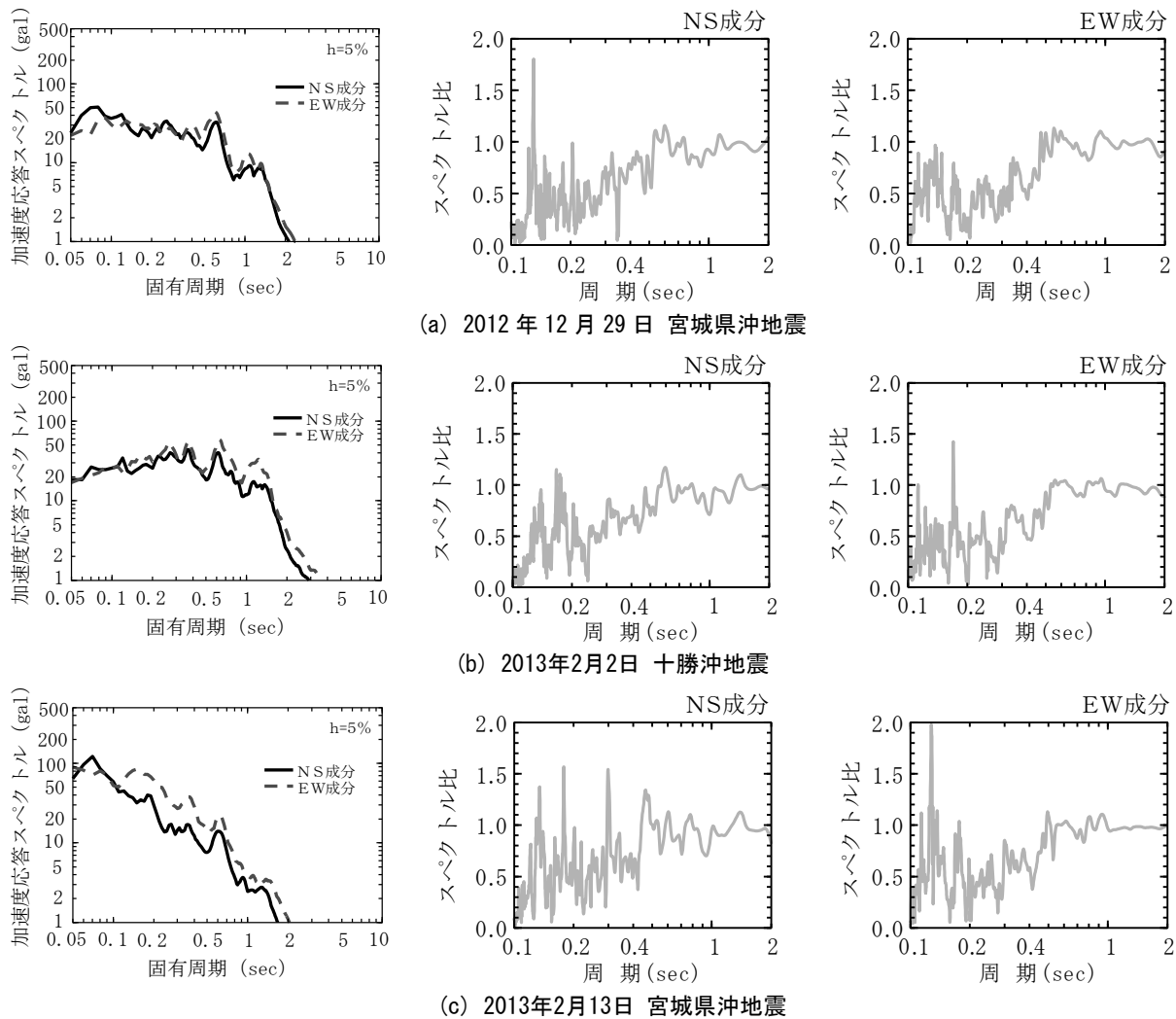


図-1 周辺地盤上の地震動の周期特性と入力損失

(2) 地震動の強度

曾波神高架橋の構造と周辺地盤のモデルの底面に、強度の異なる地震動を入力し、地盤の非線形性を考慮した地震応答解析を行うことで、地震動強度と入力損失の関係について検討した。解析に用いたモデルを図-2に示す。入力地震動には、平成23年東北地方太平洋沖地震の際に曾波神高架橋と同じ石巻市に位置する開北橋周辺地盤上（I種地盤⁶⁾）で観測された短周期成分の強い地震動を用いた。入力地震動として用いた開北橋記録の加速度時刻歴波形と加速度応答スペクトルを図-3に示す。加速度応答スペクトルの最大値は1,000(gal)を超えており、(1)で用いた中小地震の地震動強度の10倍以上になる。強度が異なる地震動としては、開北橋記録の振幅を0.5倍、1.0倍、1.5倍した地震動を用いた。地震応答解析では、フーチングは剛部材とし、モデルの底面は水平方向のみ粘性境界とした。なお、ここでは、地上部構造物の質量をゼロとすることで、kinematic相互作用の影響を考慮した解析を行った。

入力地震動の強度を変更して算出したフーチング頂部の揺れと地表面における地震動のスペクトル比（フーチング頂部／地表面）を図-4に示す。ここで、

スペクトル比の算定に用いる地表面の地震動としては、下部構造の影響を受けない解析モデル最遠端の地表面における地震動を用いている。また、図-4には、スペクトル比に移動平均フィルタをかけた結果を示している。

図-4から、フーチング頂部の揺れと地表面における地震動のスペクトル比は、入力地震動の強度により大きく変わるものではないが、入力地震動の強度が大きくなると周期0.12秒～0.7秒でスペクトル比が小さくなっており、入力損失の効果が大きくなっていることがわかる。ここで、地震応答解析により得られた地中のせん断ひずみの最大値の分布を図-5に示す。同図から、入力地震動の強度が大きくなるにつれ、せん断ひずみの最大値が大きくなっている。入力地震動の強度が大きくなると周期0.12秒～0.7秒でスペクトル比が小さくなり、入力損失の効果が大きくなったのは、せん断ひずみが大きくなったことで地盤のせん断剛性、せん断弾性波速度が小さくなり、波長が短くなったためと考えられる。

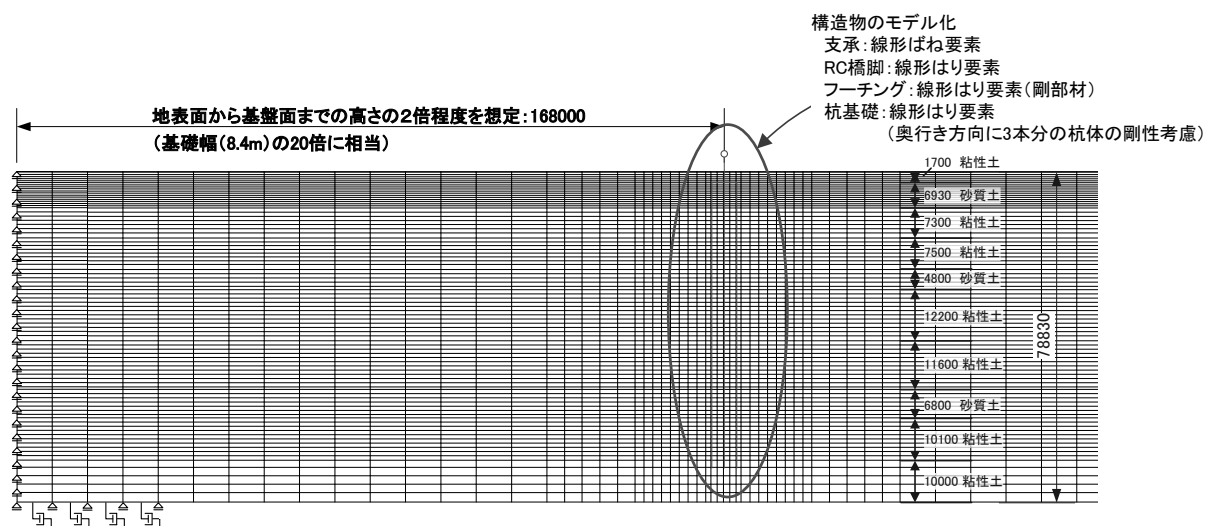


図-2 解析に用いた FEM モデル

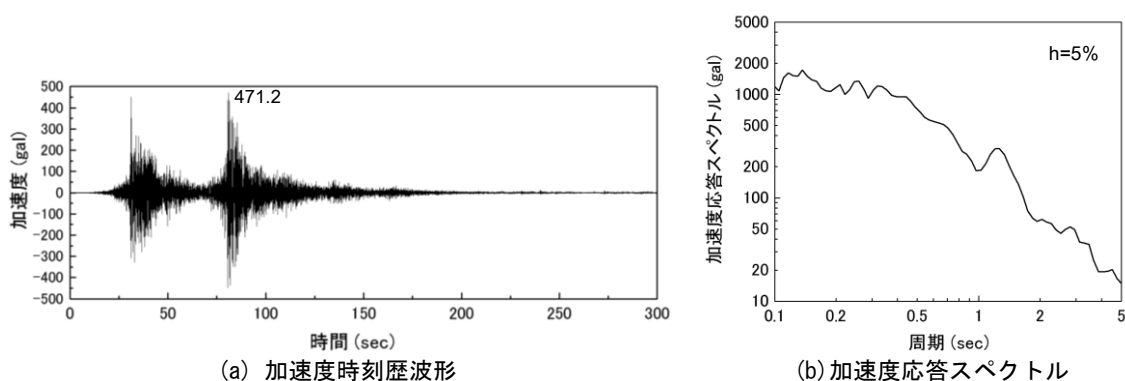
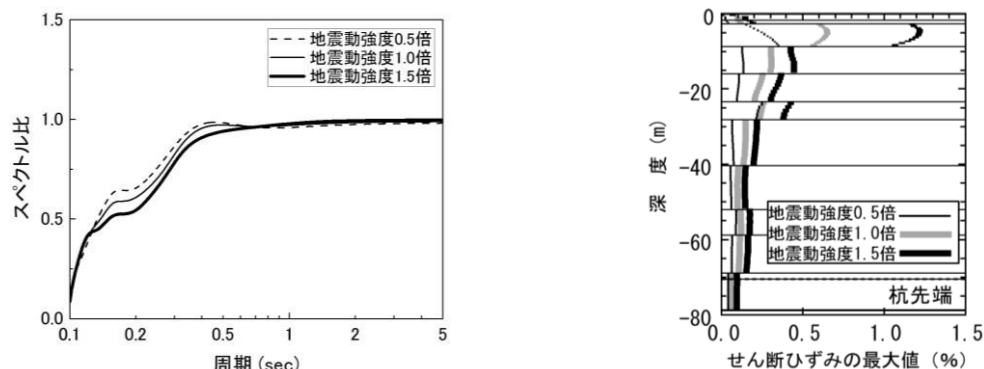


図-3 平成 23 年東北地方太平洋沖地震の際に開北橋周辺地盤上で観測された地震動 EW 成分



3. 地盤モデルと損失係数

2. (2) で用いた地盤モデルの物性値を変更することにより、基本固有周期の異なる地盤モデルを設定した上で、地盤の非線形性を考慮した地震応答解析を行い、地盤モデルと入力損失の関係について検討を行った。地震応答解析には、図-3に示す開北橋記録を入力地震動として用いた。地盤モデルとしては、2. (2) で用いた基本固有周期1.5秒の地盤モデルのせん断弾性波速度を2倍して設定した基本固有周期1.0秒の地盤モデルと、2. で用いた地盤モデルの工学的基盤の上面を深度-78.83mから深度-21.5mに変更することで設定した基本固有周期0.6秒

の地盤モデルを物性値の変更ケースとして用いた。地震応答解析で対象とした地盤モデルを表-1に示す。同表には、これらの地盤モデルに開北橋記録を入力した場合の地盤振動の卓越周期と等価せん断弾性波速度も示している。基本固有周期0.6秒の地盤モデルの基本固有周期や卓越周期は3つの地盤モデルの中で最も短い。基本固有周期や卓越周期が短くなると、表層地盤の層厚が同じであれば、せん断弾性波速度は大きくなるが、当モデルは工学的基盤の上面の位置を浅くし、表層地盤の層厚を相当に小さくして設定されたため、等価せん断弾性波速度は3つの地盤モデルの中で最も小さくなっている。

3つの地盤モデルの地震応答解析により算出した

フーチング頂部の揺れと地表面における地震動のスペクトル比を図-6に示す。スペクトル比は周期によって大きく変動するため、同図には移動平均フィルターをかけた結果を示している。

図-6から、せん断弾性波速度を2倍して設定した基本固有周期1.0秒の地盤モデルは、基本固有周期1.5秒の地盤モデルに比べ、スペクトル比が大きくなっていることがわかる。これは、せん断弾性波速度を大きくしたことにより、地震動の波長が長くなり、入力損失が生じにくくなったものと思われる。

工学的基盤の位置を浅くすることによって設定した基本固有周期0.6秒の地盤モデルについては、基本固有周期1.5秒の地盤モデルと比べ、周期0.3秒以上でスペクトル比が小さくなっている。これは、基本固有周期1.5秒の地盤モデルよりも等価せん断弾性波速度が小さく、地震動の波長が短いために入力損失が大きくなったと考えられるものである。一方、周期0.3秒以下では、基本固有周期1.5秒の地盤モデルよりもスペクトル比が大きくなっており、等価せん断弾性波速度が小さく、地震動の波長が短いにもかかわらず、入力損失の効果が小さくなっていることになる。ここで、フーチング頂部の揺れと工学的基盤面から入力した地震動のコヒーレンスを図-7に示す。同図から、どの地盤モデルについても、周期1秒以上でフーチング頂部の揺れと工学的基盤面からの入力地震動が良い相関を示しているが、基本固有周期1.0秒と1.5秒の地盤モデルについては、周期0.8秒以下で相関性が低くなっている。これに対し、基本固有周期0.6秒の地盤モデルは、周期0.8秒以下でも、フーチング頂部の揺れが工学的基盤面からの入力地震動と高い相関性を有している。これは、基本固有周期0.6秒の地盤モデルでは、工学的基盤の上面の位置を深度-78.83mから深度-21.5mに浅くしたことにより、杭長が短くなり、工学的基盤の揺れに同調する形でフーチングが振動しやすくなったためだと考えられる。これによって、せん断弾性波速度が小さく、波長が短いことで通常生じる入力損失を受けにくくなったものと考えられる。

4. まとめ

高架橋の杭基礎フーチングと周辺地盤を対象に入力地震動の強度や地盤モデルを変更した地震応答解析等を行い、地震動特性と入力損失の関係や構造―地盤モデルと入力損失の関係について次の知見を得た。

- 1) 加速度応答スペクトルの最大値が50～100gal程度の強震記録が得られた地震では、地震動の周期特性により入力損失の効果が大きく変わる傾向は認められない。
- 2) 工学的基盤面からの入力地震動の強度が大きくなり、地盤のせん断ひずみが大きくなると、せん断剛性、せん断弾性波速度が小さくなり、地震動の波長が短くなって入力損失の効果が大きくなる傾向が認められる。
- 3) 地盤の物性値を変更した地盤モデルの解析でも、

表-1 設定した地盤モデル

基本固有周期	卓越周期	等価せん断弾性波速度
1.5秒	2.0秒	157.7m/s
1.0秒	1.4秒	225.2m/s
0.6秒	0.9秒	95.6m/s

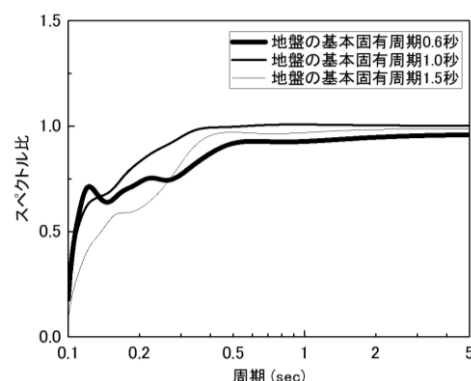


図-6 フーチング頂部の揺れと地表面における地震動のスペクトル比（フーチング/地表面）

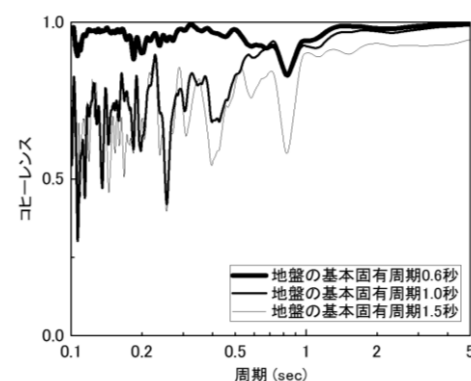


図-7 フーチング頂部の揺れと工学的基盤面からの入力地震動のコヒーレンス

せん断弾性波速度が小さくなると地震動の波長が短くなり、入力損失の効果が大きくなる傾向が認められたが、杭長が相対的に短く工学的基盤の振動とフーチングが同調して振動しやすいモデルでは、入力損失の効果が短い周期帯で抑制される。

参考文献

- 1) Kawashima, K.: Damage of bridges due to the 2011 Great East Japan Earthquake, Journal of Japan Association for Earthquake Engineering, Vol.12, No.4, pp.319-339, 2012
- 2) 林佑樹, 飯塚裕暁, 汐満将史, 小林雄, 境有紀: 2011年東北地方太平洋沖地震の宮城県における強震観測点周辺の状況と発生した地震動との対応性, 日本地震工学会論文集, 第13巻, 第5号, pp.62-101, 2013.11
- 3) 山原 浩: 地震時の地動と地震波の入力損失(第1報), 日本建築学会論文報告集, No.165, pp.61-66, 1969.
- 4) 室野剛隆, 坂井公俊: 短周期の卓越した地震動が橋梁・高架橋の耐震設計に与える 影響評価, 鉄道総研報告, vol. 26, No. 11, 2012.11.
- 5) 片岡正次郎: 地震動の入力損失, 東日本大震災による橋梁等の被害分析小委員会 最終報告書, pp. I 51-54, 2015.8
- 6) (社) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, 2012.3