

パルス性地震動を受ける橋脚の断面力に及ぼす 地盤-構造物系の非線形動的相互作用の影響

井上 貴文¹・成行 義文²

¹正会員 博（工） 徳島大学助教 大学院ソシオテクノサイエンス研究部
（〒770-8506 徳島県徳島市南常三島町2-1）

²フェロー 博（工） 徳島大学教授 大学院ソシオテクノサイエンス研究部
（〒770-8506 徳島県徳島市南常三島町2-1）

1. はじめに

橋梁構造物の耐震性能評価は、それらの合理的な耐震対策を実現する上で重要である。川島・細入¹⁾は、震度法で設計された一般的な直接基礎を有する道路橋を対象として検討を行い、兵庫県南部地震の際のような強震動を受けるとき直接基礎が浮き上がり、それは橋脚の応答に対し一種の免震効果として機能することを示した。また、井上・三神²⁾は、川島・細入¹⁾が対象とした道路橋について、地盤の非線形化と直接基礎の浮き上がり現象の両方を考慮できるマクロエレメントモデル³⁾を用いることにより、地盤の非線形化や直接基礎の浮き上がりによる橋脚断面力の低減効果をエネルギー論的な観点から検討し、そのメカニズムには複数のパターンが存在することを示した。

一方、1995年兵庫県南部地震や2004年新潟県中越地震のような内陸地殻内地震の際に観測される顕著なパルス状の波形を含む地震動（以下、パルス性地震動とよぶ）が、構造物の耐震性能を評価する上で重要であるという考えに基づき、入力地震動として模擬パルス性地震動を用いることによるパルス性地震動の特性に着目した検討が近年なされている^{例えば 1), 5), 6)}。しかしながらこれまで、直接基礎を有する道路橋における地盤の非線形化や直接基礎の浮き上がりによる橋脚断面力の低減効果に関して、模擬パルス性地震動を用いた検討はなされていない。以上のようなことより、本研究では一般的な直接基礎を有する道路橋を対象とし、模擬パルス性地震動を入力として、パルス性地震動を受ける橋脚の断面力に及ぼす基礎の浮き上がりや地盤の非線形化の影響を

パルス性地震動の特性に着目して検討する。

2. 模擬パルス性地震動を用いた検討

ここでは、パルス性地震動を受ける橋脚の断面力に及ぼす基礎の浮き上がりや地盤の非線形化の影響をパルス性地震動の特性に着目して検討する。直接基礎を有する道路橋を対象として、正弦波パルスを入力地震動として用いることにより検討を行う。

(1) 模擬パルス性地震動の定義

正弦波パルスによってパルス性地震動を模擬する。検討において用いる正弦波パルスの加速度時刻歴 $a(t)$ を次式のように定義する。

$$a(t) = \begin{cases} A_p \sin \frac{2\pi}{T_p} t & (0 \leq t < T_p) \\ 0 & (T_p \leq t) \end{cases} \quad (1)$$

ここで、 A_p はパルス加速度振幅、 T_p はパルス周期である。一例として、パルス加速度振幅が200galでありパルス周期が0.684秒のものを図-1に示す。

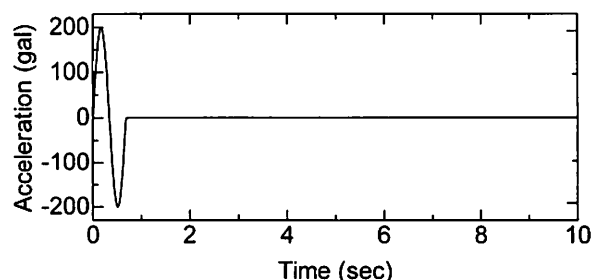


図-1 正弦波パルスの一例

(2) 検討の方法

パルス周期 T_p と検討対象システム固有の値 T_c との関係により、橋脚の断面力に及ぼす基礎の浮き上がりや地盤の非線形化の影響がいかに変化するのかを整理する。

(3) 検討対象モデル

検討対象とする道路橋^{2),7)}を図-2に示す。この橋梁は平成8年道路橋示方書に基づき試設計されたものである。地盤条件として、図-2に示す(1)N値50程度に相当する砂質地盤と(2)N値25程度に相当する砂質地盤の2種類を考える。N値50程度のものとして $V_s=295\text{m/s}$ の砂質地盤、N値25程度のものとして $V_s=230\text{m/s}$ の砂質地盤を考える。それに加え、基礎の寸法についても図-2に示す(1)6.5m×7mと(2)10m×10mの2種類を考える。解析を単純にするため、一基の下部構造とそれが支持している上部構造部分を検討対象とする。支承条件は支承剛性が十分大きく、固定支持されていると仮定する。耐震設計においてよりクリティカルである橋軸方向の応答を考える。また、橋脚は非線形挙動を示すと考えられるが、議論を単純化するため、橋脚を線形弾性体と仮定し、ベースシアを評価することにより検討を行う。モデル化した上部構造物-橋脚-基礎-地盤システムの概念図を図-3に示す。

集中質量とベルヌーイ・オイラー梁によって上部構造物と橋脚をモデル化する。梁要素の減衰係数は剛性比例型とし、減衰定数を全要素について2%とする。直接基礎の浮き上がりや地盤の非線形化の影響を考慮できる基礎-地盤系のモデルとして土木研

究所が開発した直接基礎のマクロエレメントモデルを用いる³⁾。地盤の鉛直、水平そして回転の逸散減衰係数については Gazetas⁸⁾の提案に基づき決定する。地盤の非線形特性を規定する支持力曲面、塑性ポテンシャル、硬化則のパラメーター、さらに地盤密度は Nova and Montrasio⁹⁾と中谷ら³⁾の提案によって決定する。 $V_s=295\text{m/s}$ の砂質地盤について、硬化則のパラメーター R_0 、中央鉛直荷重についての基礎底面地盤の極限支持力 V_m 、降伏曲面のパラメーター μ を決定する上で必要となる内部摩擦角 ϕ 、そして地盤密度 ρ を次のように設定する。硬化則のパラメーター R_0 は Shirato et al.¹⁰⁾と同様に次の式により設定する。

$$R_0 = 100 \times V_m / B \quad (2)$$

ここで、 R_0 、 V_m そして B の単位はそれぞれ kN/m 、 kN そして m である。中央鉛直荷重についての基礎底面地盤の極限支持力 V_m は道路橋示方書¹¹⁾に規定された静力学公式によって設定する。内部摩擦角 ϕ と地盤密度 ρ についても道路橋示方書¹¹⁾により設定する。なお、土被りの影響については無視する。

各ケースについて基礎-地盤システムは、(1)地盤を弾性体とする場合（以下、線形モデル）、(2)地盤を弾塑性体とし基礎が浮き上がる場合（以下、非線形モデル）の2つを考え、それらの地震応答を比較することにより検討を行う。 T_c については各ケースでの線形モデルの1次の固有周期とする。

(4) 模擬パルス性地震動を用いた検討

T_p として T_p/T_c が 0.8, 1.0, 1.2, 1.4 となる4つのケースを考える。パルス加速度振幅としては、

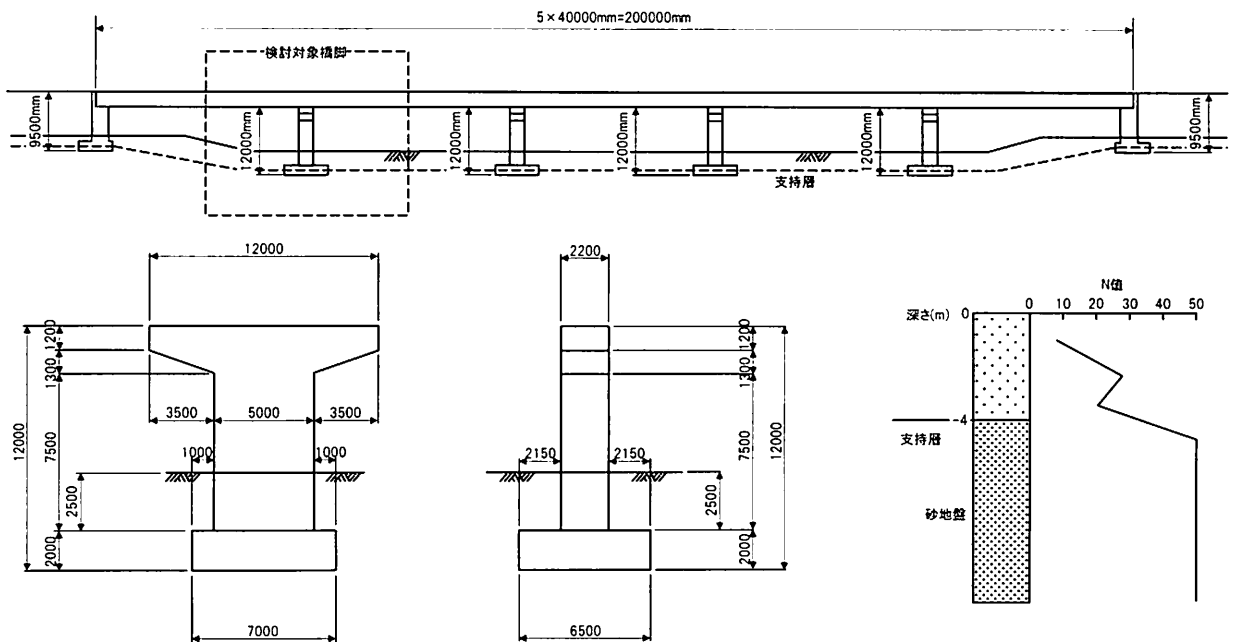


図-2 検討対象橋梁^{2),7)}

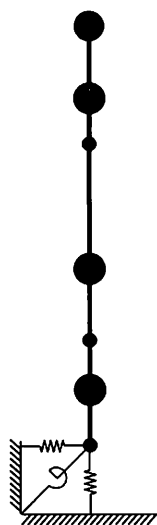


図-3 上部構造物-橋脚-基礎-地盤システムの概念図

200, 800gal の 2 つのレベルを考える。

マクロエレメントモデルによる非線形地震応答計算では、時間刻みを 0.000005 秒に設定した。時間に関する積分手法として平均加速度法を用いた。検討にあたり評価する橋梁の応答変位は図-4 に示すとおりである。図-4 に示す応答変位はそれぞれ矢印の向きが正である。

一例として、 $V_s=230\text{m/s}$ の地盤、基礎幅 $6.5\text{m}\times 7\text{m}$ 、 $T_p/T_c=1.0$ 、パルス加速度振幅 200gal のケースの上部構造の慣性力作用位置に対応する節点 1 の水平変位、基礎底面に位置する節点 7 の回転変位、非線形モデルにおける回転変位の塑性成分と回転変位の浮き上がり成分、そして橋脚に発生するベースシアを図-5 に、また 2 秒までの基礎底面に作用するモーメントと節点 7 の回転変位の関係を図-6 に示す。図-5(a), (b), (c)を見ると、振動し始めてすぐにモデル間の差異が見られ、基礎の浮き上がりや地盤の非線形化による応答の長周期化が認められる。また、図-5(c)からわかるように、顕著な断面力低減効果が見られる。断面力の低減効果とパルス周期の関係を図-7, 8 に示す。横軸は T_p/T_c であり、縦

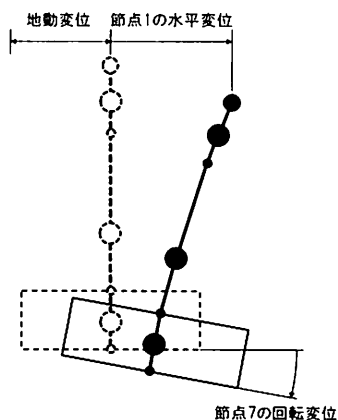
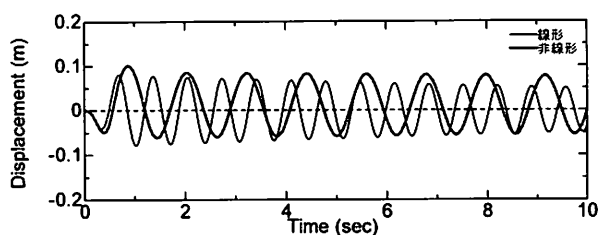
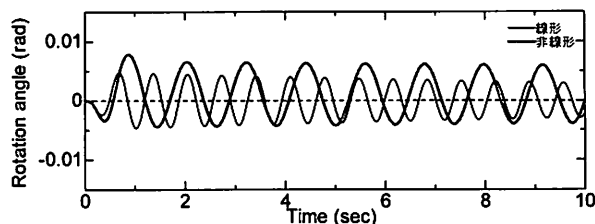


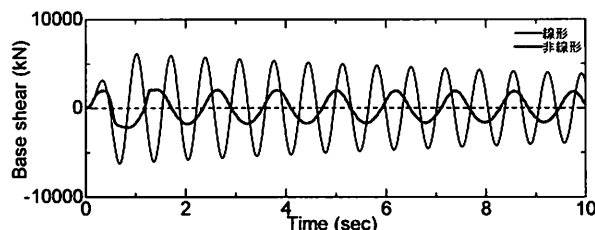
図-4 橋梁の応答変位の定義



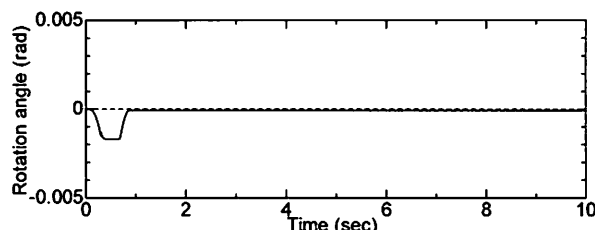
(a) 節点 1 の水平変位



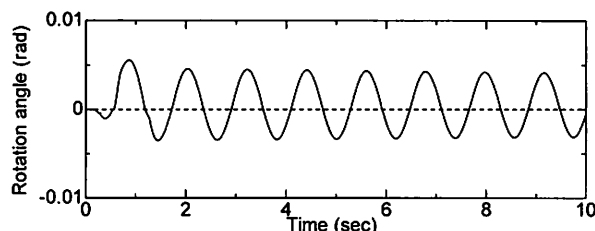
(b) 節点 7 の回転変位



(c) ベースシア



(d) 回転変位の塑性成分



(e) 回転変位の浮き上がり成分

図-5 正弦波パルス ($T_p/T_c=1.0$, $A_p=200\text{gal}$) に対する応答 ($V_s=230\text{m/s}$ の地盤、基礎幅 $6.5\text{m}\times 7\text{m}$ の場合)

軸は、線形モデルにおけるベースシアの最大値に対する非線形モデルにおけるその比であり、基礎の浮き上がりや地盤の非線形化によって橋脚の断面力が低減する程度を表している。図-7, 8 より分かるように、基礎の浮き上がりや地盤の非線形性による橋脚の断面力低減効果は、パルス加速度振幅に依らず T_p/T_c が 1~1.2 の範囲において最も大きく、それから離れるほどその効果は緩やかに低下しており、パルス周期への依存性が見られる。これは、 T_p/T_c が 1~1.2 の範囲において、線形モデルの応答が最も大きくなる傾向にあるが、基礎の浮き上がりや地

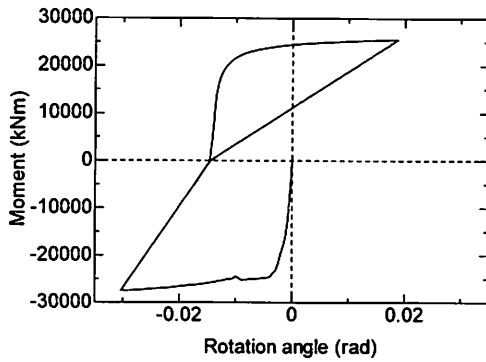


図-6 基礎底面に作用するモーメントと節点7の回転変位の関係

盤の非線形化によりモデルが長周期化し応答が最も大きくなるパルス周期帯にずれが生じ、その応答が抑えられるためであると考えられる。また、パルス加速度振幅が大きいほど、また基礎幅が小さいほど断面力の低減効果が大きくなっている。これはパルス加速度振幅が大きくなるほど、また基礎幅が小さいほど基礎の浮き上がりや地盤の非線形化が生じやすくなるためであると考えられる。これらの傾向は、

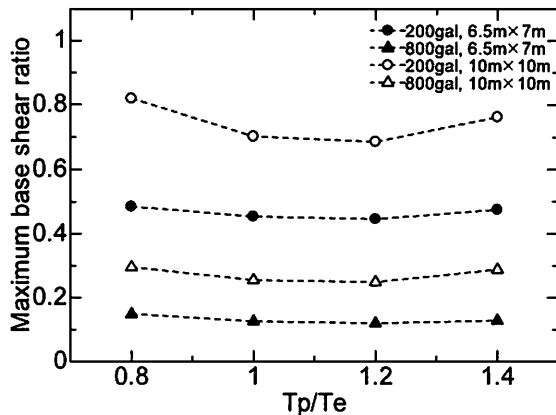


図-7 断面力の低減効果とパルス周期の関係 ($V_s=295\text{m/s}$ の地盤)

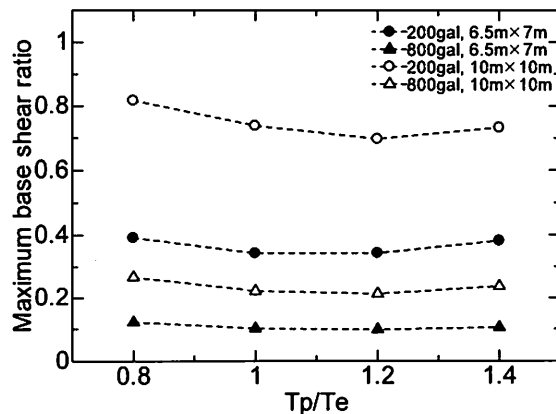


図-8 断面力の低減効果とパルス周期の関係 ($V_s=230\text{m/s}$ の地盤)

地盤の硬さに依らない。

非線形モデルにおける節点1の水平変位、節点7の回転変位の最大値についてパルス周期との関係を図-9から図-12に示す。これらより、節点1の水平変位、節点7の回転変位は、パルス加速度振幅が大きいほど、また基礎幅が小さいほど、 T_p/T_c の増大に伴い大きくなる傾向が顕著であることがわかる。これは、パルス加速度振幅が大きくなるほど、また基礎幅が小さいほど基礎の浮き上がりが生じやすくなり顕著に非線形モデルが長周期化するため、 T_p/T_c が0.8~1.4の範囲においてパルス周期が大きくなるほど応答が大きくなるためであると考えられる。さらに、地盤が軟らかいほど変位が大きくなる傾向にあるが、これは地盤が軟らかいほど地盤の非線形化の程度が大きくなり、変位の増大へ大きく寄与するからであると考えられる。図-10, 12を見ると、 $V_s=230\text{m/s}$ 、基礎幅10m、 $T_p/T_c=1.2$ 、パルス加速度振幅800galのケースでは、他は同様の条件であり $T_p/T_c=1.0$ のケースのものよりも小さな値を示しており、この傾向から外れている。これは、基礎幅が大きく、かつ地盤が軟らかいため、基礎の

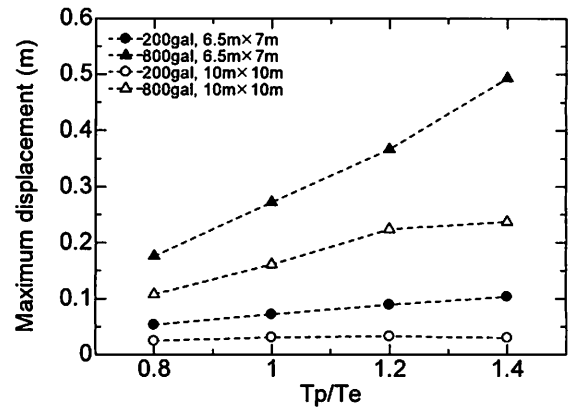


図-9 節点1の水平変位の最大値とパルス周期の関係 ($V_s=295\text{m/s}$ の地盤)

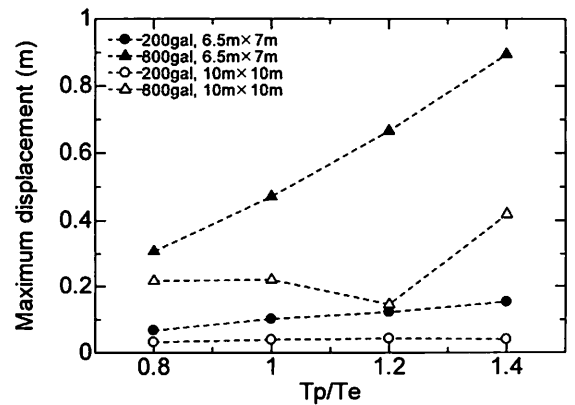


図-10 節点1の水平変位の最大値とパルス周期の関係 ($V_s=230\text{m/s}$ の地盤)

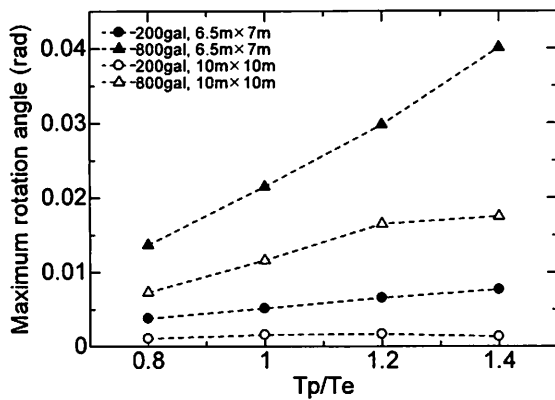


図-11 節点7の回転変位の最大値とパルス周期の関係 ($V_s=295\text{m/s}$ の地盤)

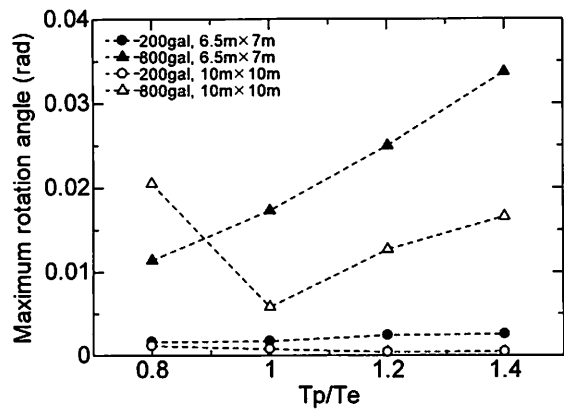


図-14 回転変位の塑性成分の最大値とパルス周期の関係 ($V_s=230\text{m/s}$ の地盤)

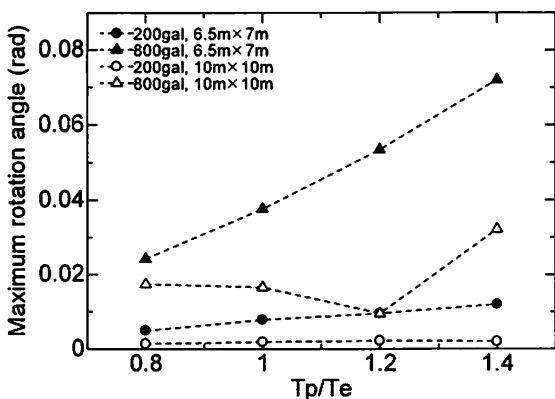


図-12 節点7の回転変位の最大値とパルス周期の関係 ($V_s=230\text{m/s}$ の地盤)

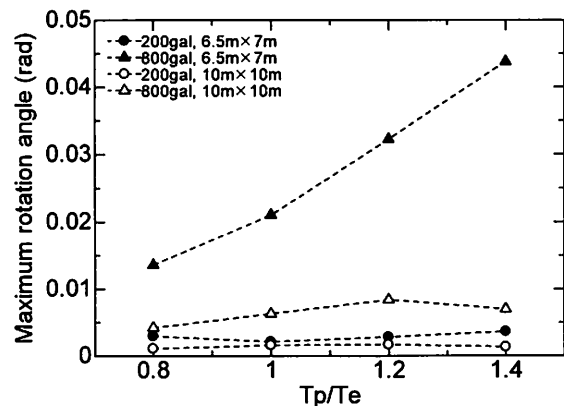


図-15 回転変位の浮き上がり成分の最大値とパルス周期の関係 ($V_s=295\text{m/s}$ の地盤)

浮き上がりよりも地盤の非線形化が卓越し、その結果大きくロッキング振動しないためであると考えられる。

さらに、非線形モデルにおける回転変位の塑性成分と回転変位の浮き上がり成分の最大値についてもパルス周期との関係を図-13 から図-16 に示す。これらの図より、回転変位の塑性成分と回転変位の

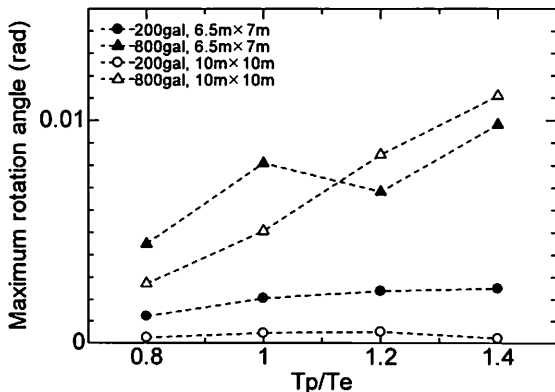


図-13 回転変位の塑性成分の最大値とパルス周期の関係 ($V_s=295\text{m/s}$ の地盤)

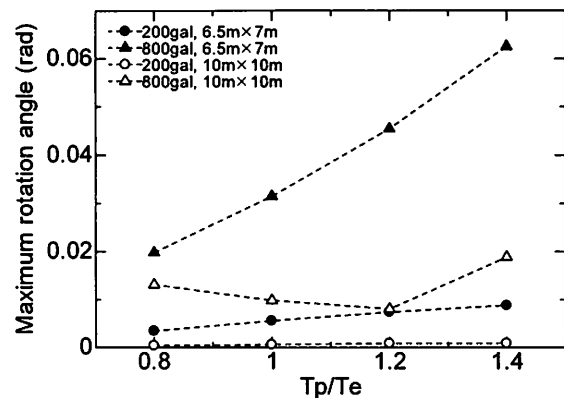


図-16 回転変位の浮き上がり成分の最大値とパルス周期の関係 ($V_s=230\text{m/s}$ の地盤)

浮き上がり成分についても節点1の水平変位、節点7の回転変位とおおよそ同様な傾向にあるが、回転変位の塑性成分のほうがばらつきの程度が大きいことがわかる。

今回得られた知見は限られた解析結果から導かれたものではあるが、他の条件についての類推を可能にするものである。これらの知見は直接基礎を有す

る橋梁構造物の耐震性能をより正確に把握し、それらの合理的な耐震対策を実現する上で有用であると考えられる。

3. まとめ

直接基礎を有する道路橋を模擬した4種類の解析モデル（2種類の基礎幅と2種類の地盤の組み合わせ）とパルス性地震動を模擬した正弦波パルスを用い、パルス性地震動を受ける橋脚の断面力に及ぼす基礎の浮き上がりや地盤の非線形化の影響をパルス性地震動の特性に着目して検討した。検討の結果、以下の結論を得た。

- 1) パルス加速度振幅に拘らず、地盤を弾性体として基礎の浮き上がりを考慮しないモデルの1次の固有周期 T_c に対するパルス周期 T_p の比 T_p/T_c の値が1~1.2の範囲において基礎の浮き上がりや地盤の非線形化による橋脚の断面力低減効果はそれぞれ最大となることがわかった。これは、 T_p/T_c が1~1.2の範囲において、地盤を弾性体として基礎の浮き上がりを考慮しないモデルの応答が最も大きくなる傾向にあるが、基礎の浮き上がりや地盤の非線形化によりモデルが長周期化し応答が最も大きくなるパルス周期帯にずれが生じ、その応答が抑えられるためであると考えられる。さらに断面力低減効果はパルス加速度振幅が大きくなるほど、また基礎幅が小さいほど大きくなる。これはパルス加速度振幅が大きくなるほど、また基礎幅が小さいほど基礎の浮き上がりや地盤の非線形化が生じやすくなるためであると考えられる。これらの傾向は、地盤の硬さに依らない。
- 2) パルス加速度振幅が大きいほど、また基礎幅が小さいほど、 T_p/T_c の増大に伴い各変位とも大きくなる傾向が顕著であることがわかった。これは、パルス加速度振幅が大きくなるほど、また基礎幅が小さいほど基礎の浮き上がりが生じやすくなり顕著に非線形モデルが長周期化するため、 T_p/T_c が0.8~1.4の範囲においてパルス周期が大きくなるほど応答が大きくなるためであると考えられる。さらに、地盤が軟らかいほど変位が大きくなる傾向にあるが、これは地盤が軟らかいほど地盤の非線形化の程度が大きくなり、変位の増大へ大きく寄与するからであると考えられる。

今回得られた知見は限られた解析結果から導かれたものではあるが、他の条件についての類推を可能

にするものである。これらの知見は直接基礎を有する橋梁構造物の耐震性能をより正確に把握し、それらの合理的な耐震対策を実現する上で有用であると考えられる。今後、今回の検討では考慮されていない土被りの影響や基礎底面でのサクシヨンの影響により、基礎の浮き上がりが抑えられ、その結果断面力低減効果がより小さく表れる可能性がある。今後、それらの影響に加え、橋脚の非線形化を考慮した検討が必要であると考えられる。

4. 謝辞：本研究では土木研究所において中谷氏らによって開発された解析プログラムを使用いたしました。記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 井上貴文，三神厚：非線形動的相互作用による橋脚の断面力低減効果のエネルギー収支に基づく検討，土木学会論文集A1（構造・地震工学），Vol.70，No.4，pp. I_1132-I_1143，2014.
- 3) 中谷昌一，白戸真大，河野哲也：直接基礎の地震時挙動を予測するための数値解析モデルの開発，土木研究所資料，第4101号，2008.
- 4) 堺淳一，川島一彦：パルス応答スペクトルに基づく断層直近地震動の特性，構造工学論文集，Vol. 45A，pp. 819-828，1999.
- 5) 鈴木恭平，川辺秀憲，山田真澄，林康裕：断層のパルス性地震動特性を考慮した設計用応答スペクトル，日本建築学会構造系論文集，第647号，pp. 49-56，2010.
- 6) 亀井功，佐藤浩太郎，林康裕：モーダル解析によるパルス波地動に対する多自由度系の層間変形角応答特性，日本建築学会構造系論文集，第649号，pp. 567-575，2010.
- 7) （社）日本道路協会：道路橋の耐震設計に関する資料，丸善，1997.
- 8) Gazetas, G.: Foundation vibrations, *Foundation Engineering Handbook*, Fang HY (ed.), van Nostrand Reinhold: NY, 1991.
- 9) Nova, R. and Montrasio, L.: Settlement of shallow foundations on sand, *Géotechnique*, Vol. 41, No. 2, pp. 243-256, 1991.
- 10) Shirato, M., Kouno, T., Nakatani, S. and Paolucci, R.: Most impacting conventional design parameters on the seismic permanent displacement of shallow foundations, *Soils and Foundations*, Vol. 52, No. 2, pp. 346-355, 2012.
- 11) （社）日本道路協会：道路橋示方書（I 共通編，IV 下部構造編）・同解説，丸善，2012.