第21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（2018年7月）

直接基礎の浮き上がりを考慮した パルス性地震動に対する橋脚の非線形地震応答特性の検討

井上　貴文[1]・成行　義文[2]

[1]正会員　博(工)　徳島大学助教　大学院社会産業理工学研究部
（〒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　大学院社会産業理工学研究部
（〒770-8506 徳島県徳島市南常三島町2-1）

1. はじめに

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直下型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，構造物の耐震性能評価において重要であるとの考えに基づいて，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なされている．

直接基礎を有する道路橋は，兵庫県南部地震の際のような強震動を受けた場合，フーチングのロッキング振動に伴い，フーチング下端が支持地盤から離れる基礎の浮き上がりが生じ，この基礎の浮き上がりが橋脚の塑性応答に対して一種の免震効果として機能することが示されている[1)]．

井上・成行[2)]は一般的な道路橋を対象として，パルス性地震動を受ける橋脚の断面力に及ぼす直接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ている．その検討では，橋脚を弾性体と仮定しているが，しかしながら現実には橋脚は塑性化することが考えられる．したがって，本研究では直接基礎を有する道路橋を模擬した解析モデル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非線形地震応答特性」に及ぼす「基礎の浮き上がり」の影響をパルス性地震動の特性に着目して検討を行った．

2. Winkler型の地盤ばね[1)]

本研究では，基礎の浮き上がりを考慮した解析モデルの地震応答と，それを考慮しない解析モデルの地震応答を比較することにより基礎の浮き上がりが橋脚の非線形地震応答に及ぼす影響について検討した．地盤はWinkler型の地盤ばねによってモデル化し，基礎の浮き上がりは鉛直方向の地盤ばねの引張り側の反力を無視することにより考慮することとした．検討に先立ち，基礎の浮き上がりを考慮した基礎-地盤系のモデル化の妥当性を震動台実験に基づき検討した．

(1) 実験概要

一基の橋脚を模擬した橋脚模型（図-1）の震動台実験（図-2）を行った．橋脚模型については，上部構造部と基礎部は鋼板，橋脚部はアルミニウム板により作成した．なお，仮想の地盤としてゴムシートを用い，入力地震動として，周期0.5秒，変位振幅

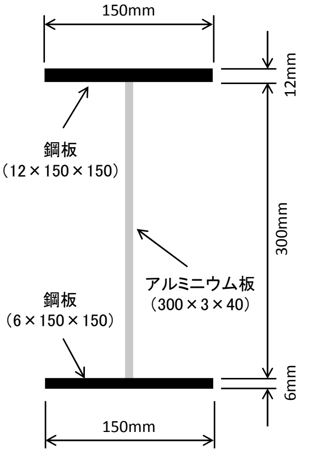


図-1　橋脚模型

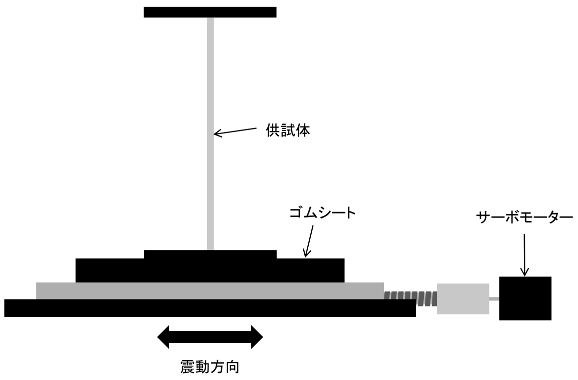


図-2　震動台実験の概要

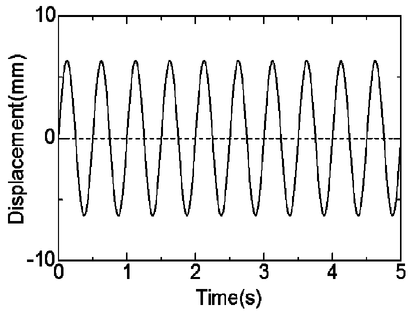


図-3　入力地震動

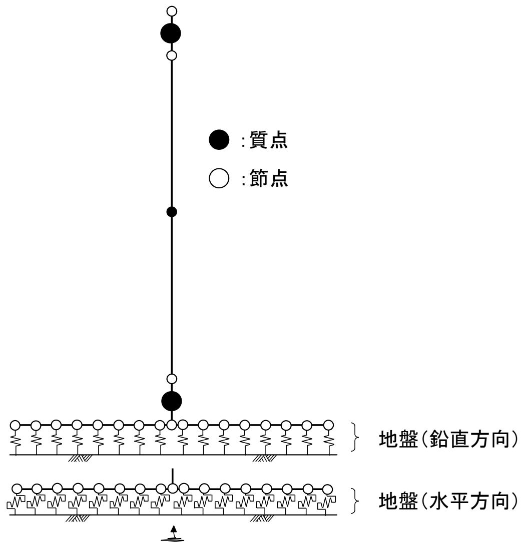


図-4　解析モデルの概念図

6.34mmの正弦波（図-3）を用いた．

(2) 検討結果

実験に用いた橋脚模型をモデル化し，震動台実験と同様な条件において地震応答解析を行った．解析には汎用動的解析ソフトTDAPⅢ[3)]を用いた．解析モデルの概念図を図-4，解析モデルのパラメーターを表-1に示す．仮想地盤であるゴムシートは，Winkler型の地盤ばねによってモデル化し，基礎の浮き上がりは鉛直方向の地盤ばねの引張り側の反力を無視することにより考慮することとした（図-5）．基礎-地盤系の剛性はゴムシートの剛性を地盤の動的変形係数に置き換え，道路橋示方書[4)]に基づいて算出した．基礎-地盤系の減衰は試行錯誤的に20%とした．地震応答計算では，時間刻みを0.001秒とし，時間に関する積分手法としてはNewmarkのβ法（β=0.25）を用いた．なお，自重解析を引き継ぎ地震応答解析を行った．

表-1　解析モデルのパラメーター

パラメーター		値
上部構造	上部構造の質量(kg)	2.094
橋脚	ヤング係数(kN/m^2)	70600000
	質量(kg)	0.0943
基礎	基礎の質量(kg)	1.036
地盤	ゴムシートの剛性(kN/m^2)	584000

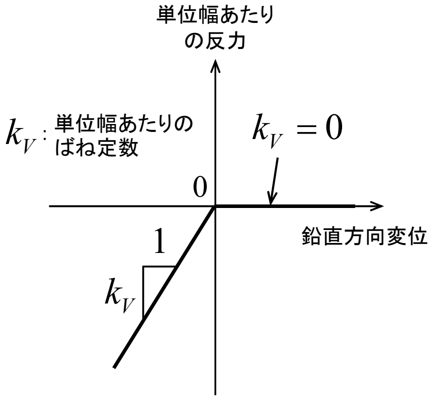


図-5　基礎の浮き上がりを考慮する場合の地盤ばねの履歴則

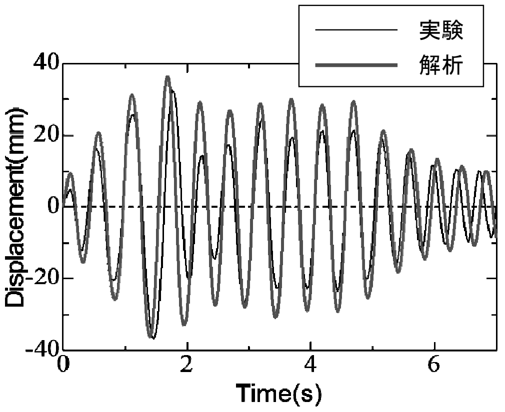


図-6　天端の相対水平変位

天端の相対水平変位と基礎の回転角の時刻歴波形について実験結果と解析結果を比較した図を図-6，

7に示す．図-6，7からわかるように，天端の相対水平変位と基礎の回転角については実験結果と解析結果がおおむね一致している．したがって，基礎-地盤系をモデル化する方法として，地盤をWinkler型の地盤ばねによってモデル化し，基礎の浮き上がりを鉛直方向の地盤ばねの引張り側の反力を無視することにより考慮することは妥当であると考えられる．

3. 正弦波パルスを用いた検討

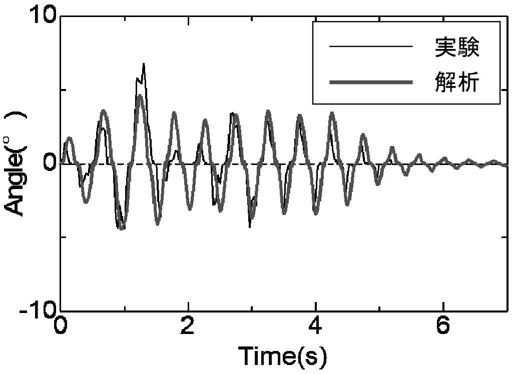
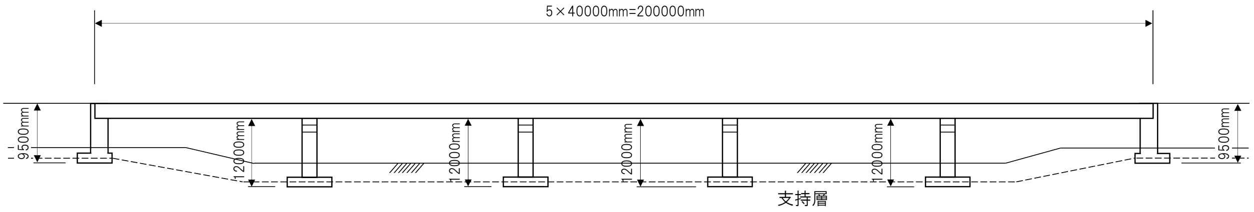


図-7　基礎の回転角

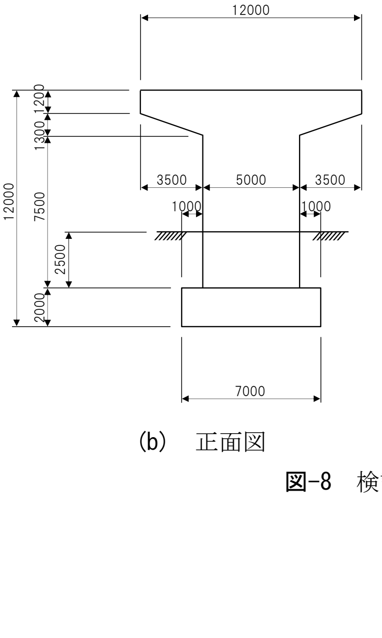
(1) 解析モデル

本研究では，図-8に示す道路橋[5)]について検討を行った．この橋梁は平成8年道路橋示方書に基づいて試設計されている．上部構造は5径間連続鋼Iげた橋であり，鉄筋コンクリート橋脚が用いられている．支持条件は，ゴム支承による地震力分散形式であるが，ここでは議論を単純化するため固定支承であると仮定した．構造条件や地盤条件が橋軸方向に大きく変化していないことから，解析を単純化するため，1基の下部構造とそれが支持する上部構造部分を1つの設計振動単位とした．また，橋軸方向の応答について検討を行った．

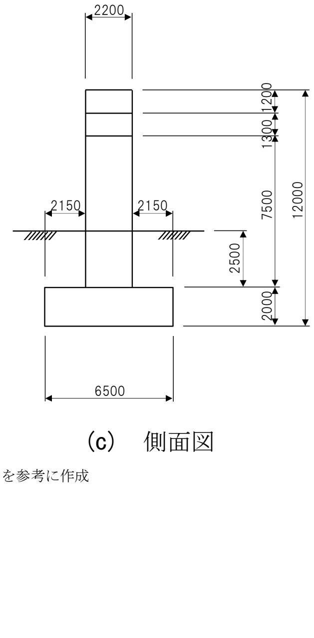
解析には汎用動的解析ソフトTDAPⅢ[3)]を用いた．離散型骨組構造モデルとしてモデル化された解析モデルの概念図を図-9，そのパラメーターを表-2に示す．上部構造と橋脚，そして基礎は，集中質量と線形はり要素によってモデル化した．上部構造は1質点としてモデル化し，橋脚の張出し部と基礎は剛体とした．塑性ヒンジ区間は，非線形はり要素によってモデル化し，曲げモーメント-曲率関係は，完全弾塑性型の骨格曲線を有する武田型とした． 地盤条件としては，N値が50程度の砂質地盤を仮定し，Winkler型の鉛直方向と水平方向の地盤ばねによってモデル化した．基礎の浮き上がりは，鉛直方向の



(a)　5径間連続鋼Ｉげた橋



(b)　正面図



(c)　側面図

図-8　検討対象橋梁[5)]を参考に作成

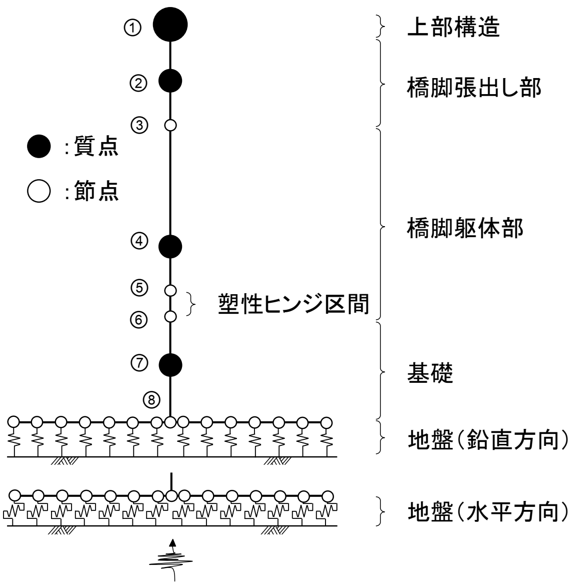


図-9　解析モデルの概念図

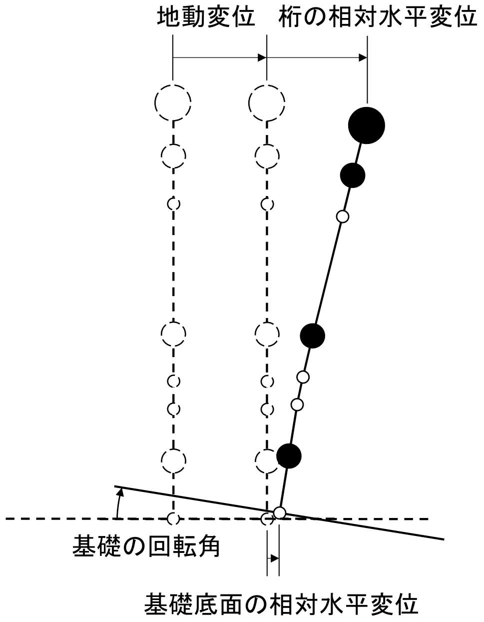


図-10　解析モデルの概念図

地盤ばねの引張り側反力を無視することにより考慮した（図-5）．道路橋示方書[4)]に基づき地盤ばねの剛性を決定した．基礎の浮き上がりに伴って地盤は降伏することが予想されるが，議論を単純にするために圧縮降伏しないものした．なお，土被りと基礎底面でのサクションは無視した．線形系の1次固有周期T_eは0.609秒である．

減衰マトリクスはRayleigh型減衰によって決定した．減衰定数は，橋脚塑性ヒンジ区間2%，橋脚塑性ヒンジ区間外5%，基礎-地盤系10%とした．

非線形地震応答計算では，時間刻みを0.001秒とし，時間に関する積分手法としてはNewmarkのβ法（β=0.25）を用いた．自重解析を引き継ぎ地震応答解析を行った．応答変位は図-10のように定義した．

(2) 入力地震動

パルス性地震動を正弦波パルスによって模擬した．検討に用いた正弦波パルスの加速度時刻歴波形$a(t)$は次式のようである．

$$a(t)=\begin{cases} A_p \sin\dfrac{2\pi t}{T_p} & \left(0 \le t < T_p\right) \\ 0 & \left(T_p \le t\right) \end{cases} \tag{1}$$

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．正弦波パルスの一例として，パルス加速度振幅が800gal，パルス周期が0.609秒のものを図-11に示す．

パルス周期T_pと線形系の1次固有周期T_eの比T_p/T_eをパラメーターとして，基礎の浮き上がりの影響を検討した．T_p/T_eが0.8から1.8まで0.1刻みで変化するよう11種類のT_pを用いた．パルス加速度

表-2　解析モデルのパラメーター

パラメーター		値
上部構造	節点①の集中質量(t)	710
橋脚	はり要素のヤング係数(kN/m^2)	6890000
	節点②の集中質量(t)	140
	節点④の集中質量(t)	206
	節点⑦の集中質量(t)	228
	節点⑦の慣性モーメント(t・m^2)	877
	非線形はり要素の降伏曲率(1/m)	0.00114
	塑性ヒンジ長(m)	0.637
地盤	単位幅あたりの鉛直方向の地盤ばねの剛性(kN/m^2)	7310000
	単位幅あたりの水平方向の地盤ばねの剛性(kN/m^2)	7310000

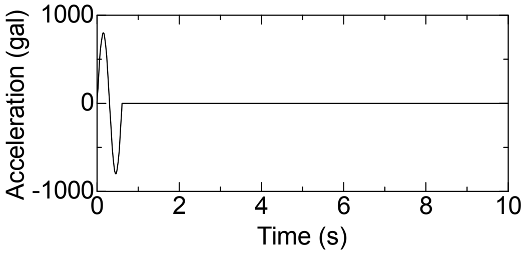


図-11　正弦波パルス

振幅は800galとした．

4. 検討結果

T_p/T_e=1.0の場合の桁の相対水平変位，基礎の回転角，塑性ヒンジ区間における曲率の時刻歴波形を図-12～14にそれぞれ示す．図-12～14からわかるように基礎の浮き上がりにより，桁の水平変位と基礎の回転角は増加するが，塑性ヒンジ区間の曲率は低減している．

図-15にT_p/T_eと塑性ヒンジの最大曲率の関係を示す．基礎の浮き上がりを考慮する場合・しない場合ともに，T_p/T_eが大きくなるほど最大曲率が大きくなっている．これは橋脚が塑性化して長周期化するためこのような傾向を示していると考えられる．図-16は図-15の基礎の浮き上がりを考慮する場合と考慮しない場合の最大曲率の比との関係を示したものである．基本的にT_p/T_eが大きいほど基礎の浮き上がりによる曲率の低減の程度は小さい．

5. まとめ

本研究では，直接基礎を有する道路橋を模擬した解析モデル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非線形地震応答特性に及ぼす基礎の浮き上がりの影響をパルス性地震動の特性に着目して検討を行った．検討の結果，以下のことが明らかとなった．

1) 基礎の浮き上がりにより，桁の水平変位と基礎の回転角は増加するが，塑性ヒンジ区間の曲率は低減する．
2) T_p/T_eが大きいほど基礎の浮き上がりによる曲率の低減の程度は小さくなる傾向がみられる．

今後，入力地震動の種類をさらに増やして検討を行うことや地盤の材料非線形性の考慮した検討が必要であると考えられる．

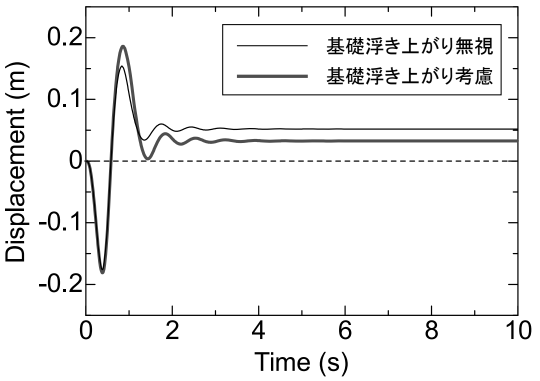


図-12　桁の相対水平変位

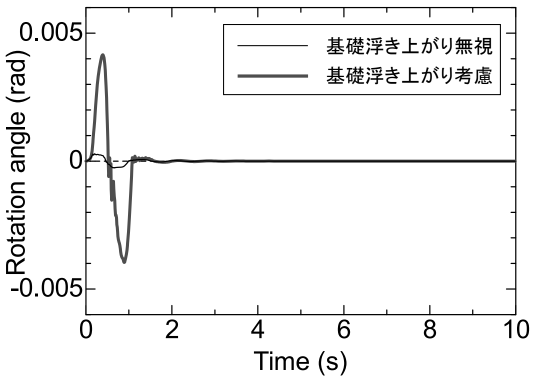


図-13　基礎の回転角

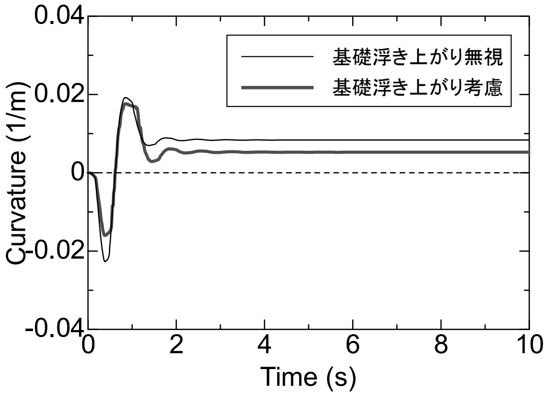


図-14　塑性ヒンジ区間の曲率

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，成行義文：パルス性地震動を受ける橋脚の断面力に及ぼす基礎と地盤の非線形動的相互作用の影響，構造工学論文集，Vol.61A，pp. 256-264，

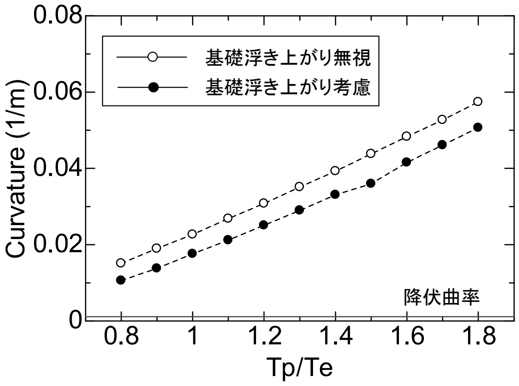


図-15　曲率の最大値

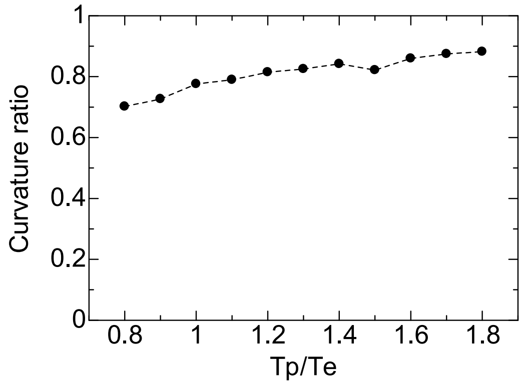


図-16　基礎の浮き上がりによる曲率の低減

2015

3)　(株) アーク情報システム：TDAPIII ver3.00 理論説明書，2007.

4)　(社) 日本道路協会：道路橋示方書 (V耐震設計編)・同解説，丸善，2012.

5)　(社) 日本道路協会：道路橋の耐震設計に関する資料，丸善，1997.