

# ケーソン基礎のプッシュオーバー解析に用いる 地震時慣性力の考え方に関する一考察

The method of push over-analysis with considering the inertial force of a caisson foundation

坂井公俊\*, 室野剛隆\*\*, 西岡英俊\*\*

Kimitoshi Sakai, Yoshitaka Muro, Hidetoshi Nishioka

\*工修, (財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)

\*\*工博, (財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)

In this study, we proposed the new methodology to evaluate the behavior of a pier with a caisson foundation under strong earthquake by means of a push-over analysis. Firstly, we showed that we can hardly estimate the dynamic response of the pier with caisson foundation accurately using the static analysis without considering the inertial force of foundation. Secondly, we proposed the simple push-over analysis, taking into account the influence of the inertial force of foundation. Finally, we clarified through dynamic and the static analysis that the proposed method estimates the dynamic behavior of the caisson structure in a good accuracy.

*Key Words: caisson foundation, push-over analysis, seismic design*

キーワード: ケーソン基礎, プッシュオーバー解析, 耐震設計

## 1. はじめに

現在の鉄道構造物の耐震設計<sup>1)</sup>において, 構造物の降伏震度, 等価固有周期の算定, 構造物の破壊形態の判定を行う際には, プッシュオーバー解析<sup>2)</sup>が多くの場合で実施されている. さらにプッシュオーバー解析により得られた等価固有周期, 降伏震度をもとに, 所要降伏震度スペクトルを用いた非線形応答スペクトル法<sup>3)</sup>によって地震応答値を算定しており, これと構造物が保有する制限値を比較することで性能の確認を行う, といった照査の流れが耐震設計の基本となっている. さらに鉄道以外の分野においても, プッシュオーバー解析は構造物の保有性能を得るためには必須の設計手法となっている<sup>4)</sup>.

プッシュオーバー解析では, 一般に構造系の損傷過程や保有性能を荷重-変位関係という形で表記することが多い. この荷重-変位関係を用いて地震時の耐震性能を評価するためには, 地震時の動的応答に近い形での慣性力を考慮することが必要である. 杭基礎を有する構造に対しては, 地震時の詳細な応答分布に従った形でのプッシュオーバー解析手法の提案が行われている<sup>5)</sup>ものの, これまで地震時の応答性状を考慮した慣性力の考え方についての検討は少ない. 鉄道構造物における代表的な

基礎形式に対するプッシュオーバー解析時の慣性力作用の方法を図-1に概略的に示す. 直接基礎, 杭基礎を有する構造物については, 桁の全重量とフーチングの有効重量を同一震度で作用させることにより, 地震時性能の確認を行っている. これに対してケーソン基礎を有する構造物の場合, 桁と柱の慣性力のみを考慮しており, 基礎の慣性力は無視している. ここでケーソン基礎とは, 地上で製作した比較的大型で中空の基礎躯体を掘削しながら沈下させて設置する基礎形式であり, 上部構造物(橋脚)と中空の基礎躯体部は版状の構造物部材(頂版)で連結されている. そしてこの基礎躯体中空部には沈設用の荷重として水または中埋め土が充填されている.

このように, 杭基礎においては杭体, ケーソン基礎においては基礎全体の慣性力を無視してプッシュオーバー解析を行っている理由としては, 図-1に示している耐震設計上の地盤面(直接基礎, 杭基礎においてはフーチング下面, ケーソン基礎においては頂版上端であり, 地表面とは異なる)よりも上部の構造に対する地震時慣性力のみ考慮し, 耐震設計上の地盤面以深の慣性力は無視する, という設計上の取り扱いに基づくものである. この考え方は, 例えば杭体のように地盤面以深の構造物重量が小さい場合にはそれほど問題とならないと考え

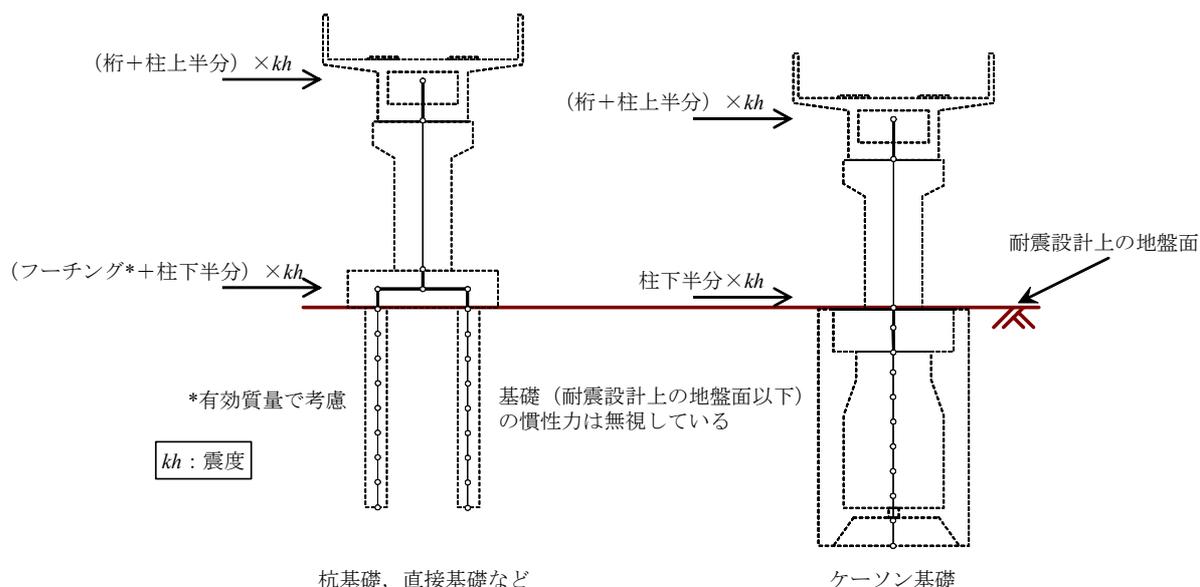


図-1 プッシュオーバー解析を行う際の地震時慣性力の考え方

られる。しかしながらケーソン基礎のように重量の大きな基礎形式を持った構造物に対しては、耐震設計上の地盤面以深の地震時慣性力を無視することの妥当性は不明である。重量の大きな基礎躯体の慣性力を無視することで、ある地震動が作用した場合の応答値や、構造物自体が保有する限界応答値、靱性率などの性能を誤って評価している可能性も考えられる。

そこで本検討では、ケーソン基礎の性能を正しく把握するために、プッシュオーバー解析において考慮する地震時慣性力の考え方について検討を行う。具体的な手順としては、まず図-1 に示した現在の鉄道構造物の耐震設計標準に従ったプッシュオーバー解析の結果と動的解析の結果を比較することにより、現行法の問題点を確認する。その後、構造物の動的応答特性を考慮した地震時慣性力の適切な考慮方法について提案を行うとともに、この方法によって動的解析と同様の骨格を再現し、地震時の応答性状により近い形での性能把握が可能であることを示す。最後に実設計を念頭に置いた簡便な慣性力考慮の方法の提案を行い、この簡便な手法を用いても動的解析より得られる骨格を再現できることを確認する。

なお、地震時の基礎-地盤間の動的相互作用は、イナーシャル相互作用とキネマティック相互作用に大別することが出来る。本検討におけるプッシュオーバーではこのうちキネマティック相互作用を無視した状態で検討を行っている。この基礎-地盤間の2つの動的相互作用は、構造物-基礎-地盤を一体でモデル化した有限要素解析などを用いることで、自動的に考慮できるものと考えられるが、実際の設計においてこういった手法が用いられることは稀である。実際には、基礎-地盤の相互作用を簡易に表現する一般的な方法として、プッシュオーバー解析にもとづく非線形応答スペクトル法と応答

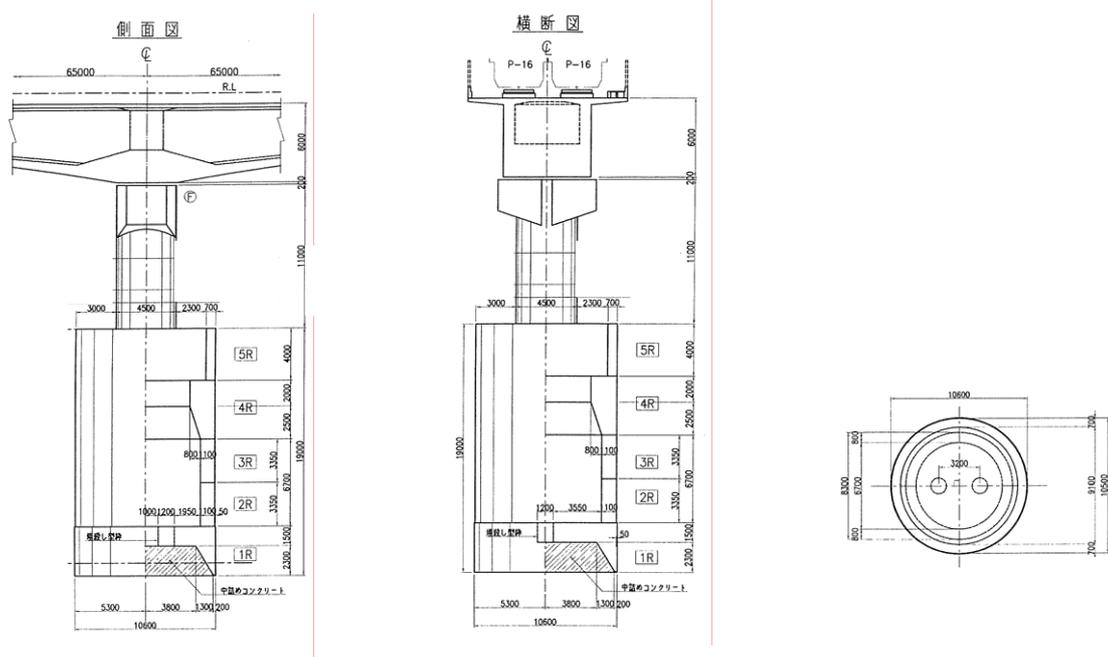
変位法<sup>6)</sup>などを組み合わせて用いることで、両者の相互作用を考慮している場合が多いと考えられる。これは、地震時慣性力とその際の地盤変位を同時に静的に作用させるものであり、これを用いることで、地盤と基礎の位相差や、地震応答値などを良好に再現できることは確認済である。よって今回は、キネマティック相互作用を無視した状態での地震時慣性力を正確に表現することを目的とする。こうすることで、応答変位法によって地盤変位を考慮した場合にも、従来よりも精度の高い地震応答値を推定できることが期待される。

さらに、本検討では鉄道構造物を設計する際のプッシュオーバー解析の適用範囲である、基礎と橋脚の変形モードとして同方向に変形する単純なモードが卓越した構造に対して検討を進めている。変形モードが複雑で主要なモードが特定できない構造物に対してこうしたプッシュオーバー解析は適用不可能であり、設計上も注意を要する。

## 2. 現行法によるプッシュオーバー解析結果と動的解析結果の比較

### 2.1 解析モデルと解析条件

ここでは、耐震設計上の地盤面以下の慣性力を無視している現在のプッシュオーバー解析による地震時性能把握が、詳細な動的解析の結果をどの程度再現できているかについて確認を行う。対象とした構造は、図-2 に示す柱高さ 11.0m、基礎長さ 19.0m の複線用円柱式橋脚ニューマチックケーソン基礎である<sup>7)</sup>。解析の検討方向は、図-2 (b)の線路直角方向とした。地盤条件としてはプロトタイプとして表-1 に示す地盤を想定した。実際の検討においては、基礎の変形が顕著になるような場合



(a) 線路方向

(b) 線路直角方向 (検討断面)

(c) 基礎断面図

図-2 解析対象構造物

表-1 地盤条件

土質	層厚 (m)	N 値	湿潤単位体積重量 $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	せん断波速度 Vs (m/s)
砂礫	3.54	40	19	300
砂質土	3.86	15	19	270
砂礫	3.45	40	20	460
砂質土	8.15	15	18	280
砂礫	-	50	21	530

においても検討を行うため、地盤の初期剛性のみを0.1倍、0.01倍とした場合についても行っている。表-1に示す地盤の固有周期は0.251秒となり、普通地盤(G3地盤)<sup>1)</sup>に分類される。地盤パラメータを変化させた3パターンの結果は、地盤剛性が低くなるに従い全体系に占める地中部の変形の割合が大きくなるという傾向の違いがあるものの、いずれの結果においても以降で検討を行う手法の妥当性は確認している。今回はそのうち地盤剛性を0.1倍とした場合(地盤周期0.794秒で軟弱地盤(G5地盤)の場合)についての結果を示す。

構造解析モデルを図-3に示すが、今回は対象構造物を2次元骨組解析モデルによって表現することとした。橋脚は柱下端に $M-\theta$ ( $M$ :曲げモーメント, $\theta$ :回転角)関係を与えて設定し、基礎躯体はフーチングを剛体、フーチング以深は曲げ剛性を考慮した部材として設定している。また、構造物と地盤の相互作用は、鉄道構造物の設計標準<sup>8)</sup>を参考に、基礎側面の水平、鉛直ばね、基礎下端の水平、鉛直ばねをモデル化した。なお既に述べたとおり、本検討の目的は、地震時に慣性

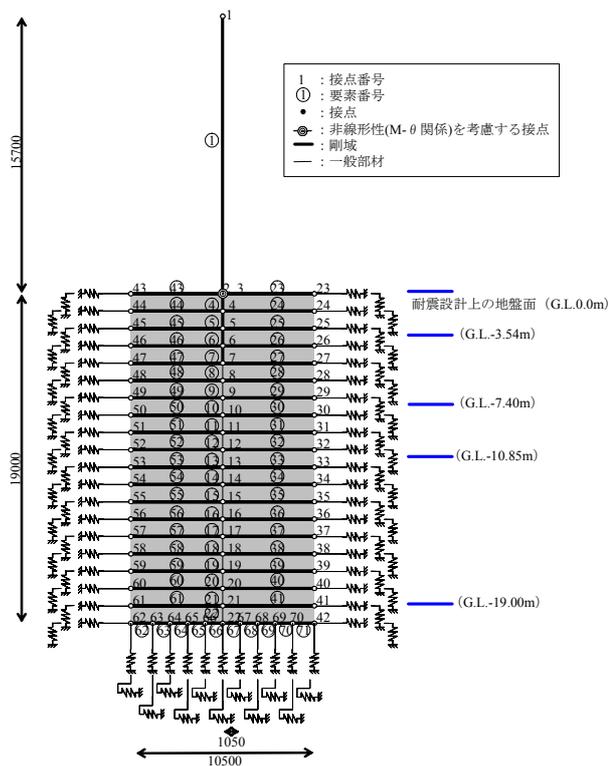


図-3 解析モデル

力が構造物に対してどのように作用しているかを知ることであるため、地盤変位については無視して検討を行っている。

## 2.2 プッシュオーバー解析結果と動的解析結果の比較

前節の解析モデルに対して、動的解析を実施することで橋脚上端の応答加速度-応答変位の関係(荷重-変位

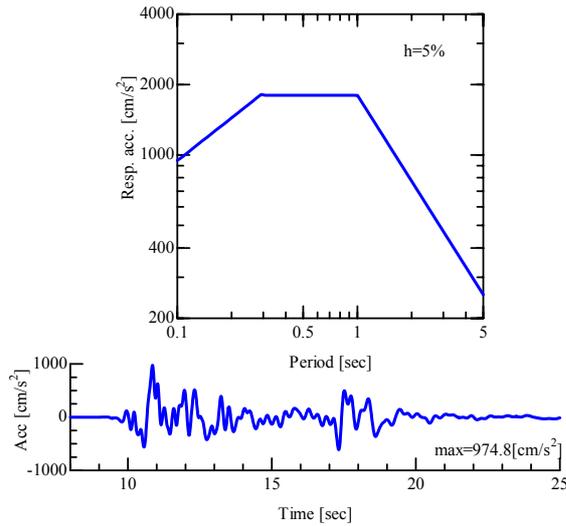


図-4 動的解析で用いた入力地震動  
(L2 地震動スペクトル II (G3 地盤) 適合波)

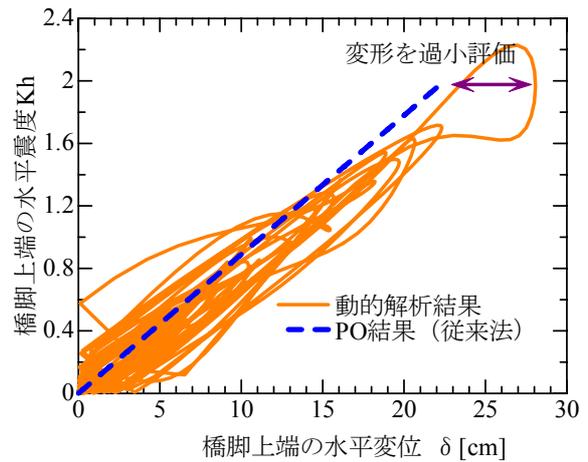


図-5 動的解析結果と従来法による  
プッシュオーバー解析結果の比較

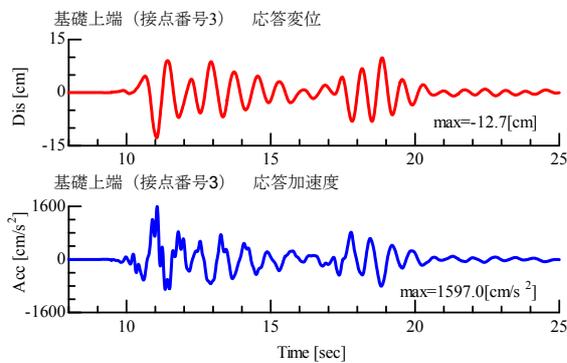


図-6 動的解析による基礎先端位置の  
応答加速度, 応答変位

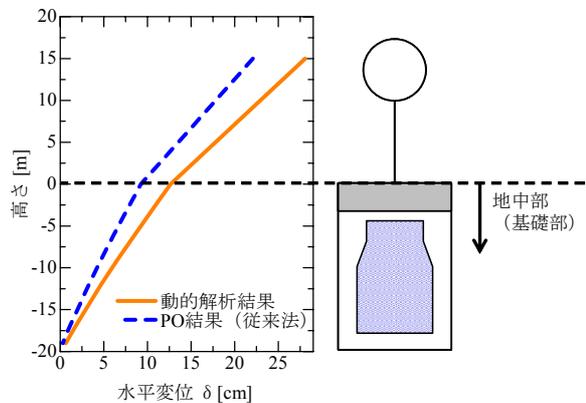


図-7 動的解析とプッシュオーバー解析  
による応答変位分布の比較

関係)を算定する。入力地震動としては L2 地震動スペクトル II (G3 地盤)<sup>1)</sup>を用いた。これは、鉄道構造物の安全性を確認するための地震動であり、兵庫県南部地震のような内陸活断層によるマグニチュード7級の地震が直下で発生した場合を想定したものである。図-4に減衰定数5%の弾性加速度応答スペクトルと時刻歴波形を示す。またケーソン基礎のような大型基礎近傍における地震動は、構造物の存在のために、自然地盤の地震動に比べて高い振動数成分が低減される<sup>9),10)</sup>。この有効入力動を簡易に考慮するための手法も提案されている<sup>11),12)</sup>が、本検討ではその影響は考慮せず、自然地盤における地震動がそのまま構造物に作用するものとして検討を行う。さらに、地震動が地盤を伝播する過程において、増幅や地盤の非線形挙動等の影響を受けるため、深度ごとに異なった地震動分布となっているものと考えられるが、今回は上記地震動を全地盤ばねに一樣に入力して検討を行っている。

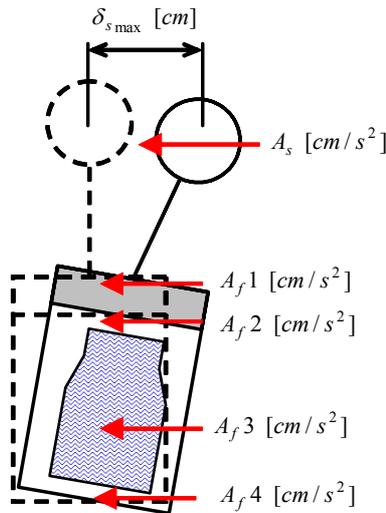
動的解析時に考慮する減衰としては、要素別減衰定数

からひずみエネルギー比例減衰法により全体減衰を求め Rayleigh 減衰により設定した。各要素の減衰定数は、橋脚、基礎躯体に5%、地盤ばねは10%とした。なお、現象を単純化し、解釈を容易にするために、本節における解析は全て弾性解析として実施しているが、地盤ばね、構造物の非線形性を考慮した解析を行っても同様の傾向となることは確認している。

解析により得られた橋脚上端の応答震度(応答加速度)ー変位関係を図-5に、基礎先端位置(図-3の接点番号3)における応答加速度、応答変位の時刻歴波形を図-6に示す。図-5中の構造物の応答加速度から震度への換算は、重力加速度(=9.8m/s<sup>2</sup>)で除することにより表現しており、応答加速度を応答震度に補正するための係数などは考慮していない。以降の検討では、この動的解析によって得られた骨格(基礎ー地盤の動的相互作用を無視した状態での応答)をプッシュオーバー解析によってどの程度精度良く再現出来るか、といった観点から議論を進める。

Step 1 動的解析結果から橋脚変形量最大時を抽出

Step 2 橋脚と基礎各位置の応答加速度比に従った慣性力を考慮したプッシュオーバー解析



$$\alpha = A_f / A_s$$

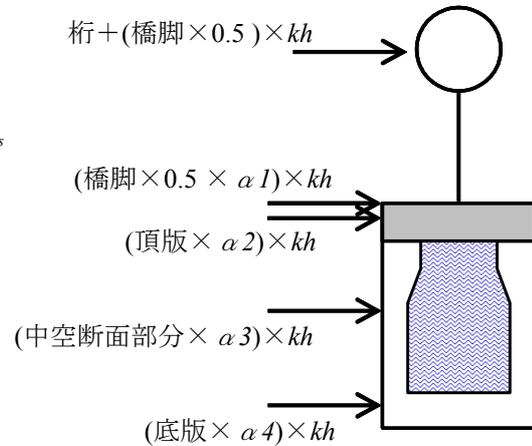


図-8 応答加速度に従ったプッシュオーバー解析の考え方  
(提案法 1: 動的解析による応答加速度分布を用いる場合)

図-5 には、現在の鉄道構造物耐震設計標準<sup>1)</sup>にもとづいた、基礎の地震時慣性力を無視したプッシュオーバー解析による結果(従来法)も併記しているが、両者の結果を同一震度の応答変位で比較すると、動的解析による結果の方がより変形が大きくなっていることが分かる。また、プッシュオーバー解析結果の加速度-変位関係から得られる固有周期は0.67秒となっており、固有値解析結果による1次モードの固有周期(0.72秒)と比較して短い結果となっている。

さらに図-6より、基礎は最大で約13cm変形しているとともに、応答加速度としても1600cm/s<sup>2</sup>程度の応答を示していることが見てとれる。つまり1600cm/s<sup>2</sup>相当の慣性力が基礎に作用していることが分かる。また図-7には、動的解析によって最大変位を示した瞬間の応答震度を作用させた場合のプッシュオーバー解析による構造物全体の変位分布と、動的解析による最大変位分布を比較して示している。この結果を見ると、基礎上端位置(図-7の高さ0m)において動的解析とプッシュオーバーの結果には大きな応答変位の差があるとともに、基礎の回転角も動的解析結果がより大きくなっている。この基礎上端位置での水平変形、回転成分の差が、橋脚上端位置での水平変形の差の大きな要因となっていることはこの結果から明白である。

以上より、基礎の慣性力を無視したプッシュオーバー解析では、動的解析結果と比較して構造物全体系の剛性を大きく評価しており、構造物の性能を正しく評価できていないと言える。さらに得られた結果に対して非線形応答スペクトル法を適用して地震時応答を算定する場合には、応答を過小評価してしまう可能性がある。

### 3. 地震応答加速度に従った基礎慣性力考慮の方法

#### 3.1 動的解析による応答加速度分布を用いる場合(提案法 1)

前節の検討から、ケーソン基礎躯体の地震時慣性力を無視することで、構造物全体系の周期を短く見積もってしまい、正確な性能を表現できない可能性があることが示唆された。そこで本節ではプッシュオーバー解析によって地震時損傷過程や保有性能をより高い精度で推定するために、基礎の地震時慣性力を考慮した慣性力の作用方法について検討を行う。提案する慣性力の考慮方法(提案法 1 と呼ぶ)を図-8 に示すが、この手法は地震時の各位置の応答震度分布(応答加速度分布)に従った形で地震時慣性力を静的に作用させる方法である。

まず Step 1 として動的解析の結果より橋脚天端変位が最大となる時刻を探索する。この瞬間における橋脚の応答加速度  $A_s$  と基礎の加速度  $A_f$  を抽出し、両者の比  $\alpha = A_f / A_s$  を求める。次に Step 2 として、この応答加速度比  $\alpha$  を上部工と基礎各要素の応答震度の比と考え、この震度比に従った慣性力を作用させる。これにより、基礎と橋脚の応答加速度の違いを考慮したプッシュオーバー解析が可能となると考えられる。

図-3 の解析モデルに対して提案法 1 を適用する。図-9 に動的解析から得られた橋脚天端での応答変位、各位置での応答加速度の時刻歴波形を示す。まず Step 1 として、橋脚天端の変形が最大となる時刻を抽出する(11.03 秒)。この時刻での各位置での応答加速度を抽出し、橋脚上端の応答加速度(1926cm/s<sup>2</sup>)との比  $\alpha$  を算定

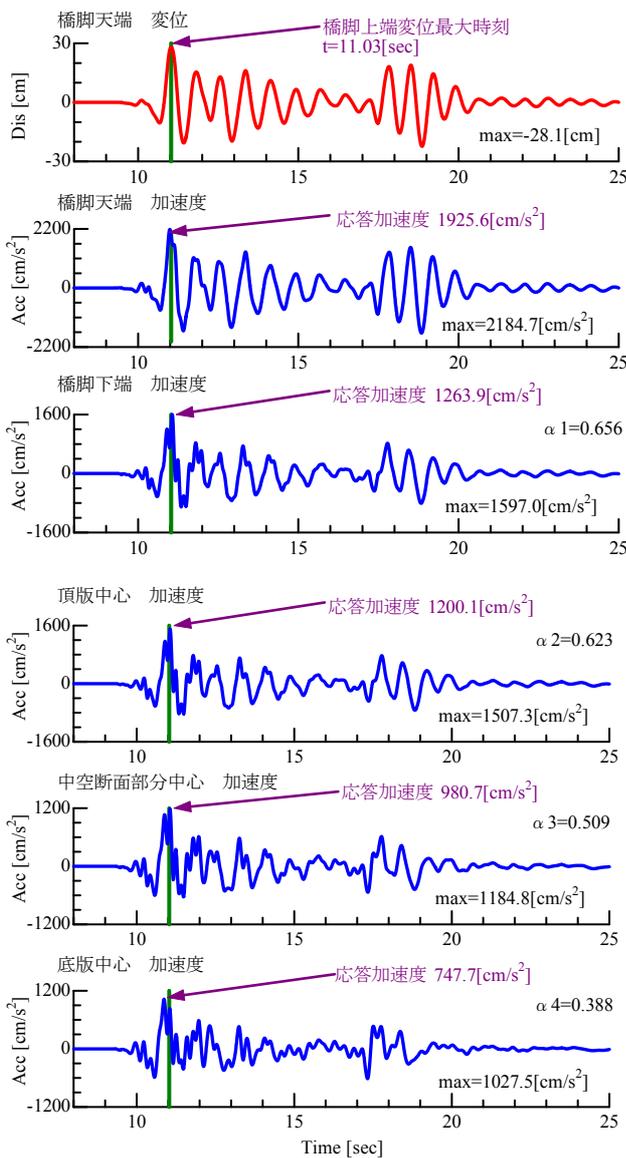


図-9 各位置における応答波形

する。なお、加速度比 $\alpha$ を算定時する際の加速度は、動的解析の減衰等の影響で最大加速度とは異なっている。Step 2でこの応答加速度の比を慣性力の比として考慮したプッシュオーバー解析を実施した。本手法により得られた結果を図-10に示す。この結果より、提案法1を用いることで、従来の結果よりも動的解析の結果に近い構造物の周期を再現できていることが分かる。つまり、実際の地震時応答加速度分布に従った慣性力を橋脚、基礎躯体全てに考慮したプッシュオーバー解析を実施することで、構造物の性能を高い精度で推定可能であるといえる。

### 3.2 プッシュオーバー解析による応答変位分布を用いる場合 (提案法2)

地震時の橋脚と基礎の応答加速度の比を上部工と基礎の応答震度の比と解釈し、その震度比を考慮したプッシュオーバー解析を実施することで、動的解析と整合性

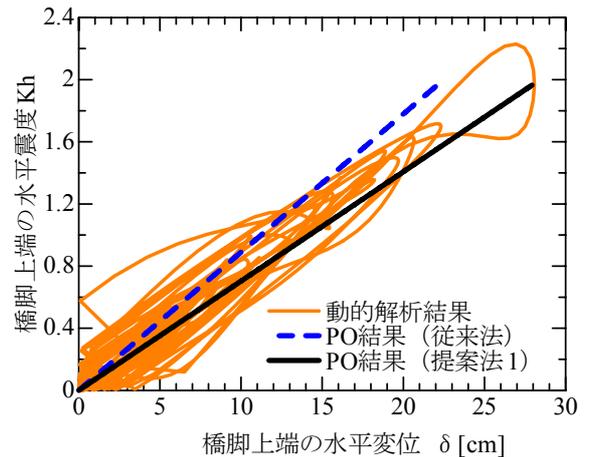


図-10 提案法1によるプッシュオーバー解析結果

の高い地震時性能を把握できることが示された(提案法1)。しかしながら図-8の手法によって応答値分布を算定し、応答震度の比を求めるには大きな労力を要する。さらに本手法を適用する前に一旦動的解析を行う必要があるため、プッシュオーバー解析+非線形応答スペクトル法(+応答変位法)といった簡易な地震応答値算定法の利点が失われてしまうことになる。また、動的解析による応答加速度分布という比較的高振動数の結果を用いるため、高次モードや計算の収束誤差などの影響により、不安定な慣性力分布を与えてしまう可能性がある。実際、図-9などを見ると、各位置の応答加速度波形は、変位と比較してパルス的な成分を多く含んでいることが見て取れるが、このパルス的な加速度は構造物全体系の変形にはそれほど寄与していないことも分かる。そこで本節では、より簡便な手続きによってケーソン基礎と上部工の応答震度の比を安定した結果として推定し、その結果に基づき基礎の慣性力を考慮する手法について検討を行う。

図-11, 12に動的解析による頂版上端と橋脚天端の応答加速度、応答変位の関係を示す。図-11は構造物、地盤とも線形の場合(線形解析と呼ぶ)、図-12は構造物、地盤ともに塑性化を考慮した結果(非線形解析と呼ぶ)である。全ての図にはいずれも同じ勾配を持った直線(具体的には $y = 2.2 \times x$ の直線)も併せて示している。各図(b)の変位応答結果を見ると、基礎と橋脚の変形は同位相で、かつ概ね等しい振幅比(基礎:橋脚=1:2.2)で振動していることが分かる。これは橋脚-基礎一体系での変形モードとして、橋脚、基礎が同一方向に振動する1次モードが主体的であることを示唆している。さらに図-11(a)における基礎-橋脚の加速度応答においても同様の結果となっている。しかしながら図-12(a)における結果は、 $y = 2.2 \times x$ の直線上に乗っているとはいえず、基礎と橋脚が逆位相の加速度分布となっている瞬間も存在する。これより高振動数の振動を見た場合には、高次モードの振動も無視できない結果となっていると

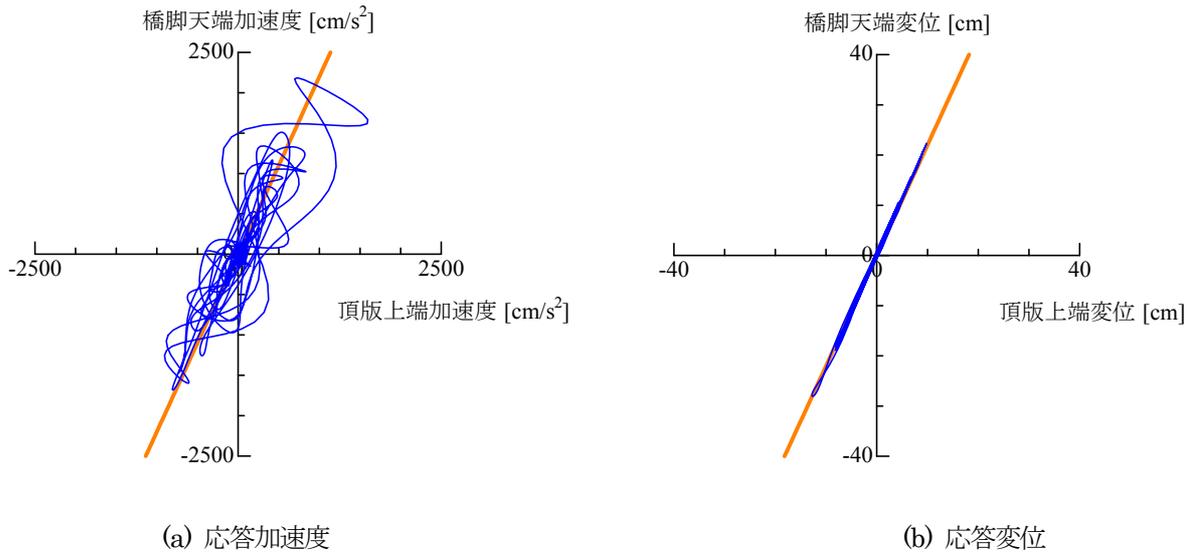


図-11 橋脚天端-頂版上端の応答加速度, 応答変位の関係 (線形解析)

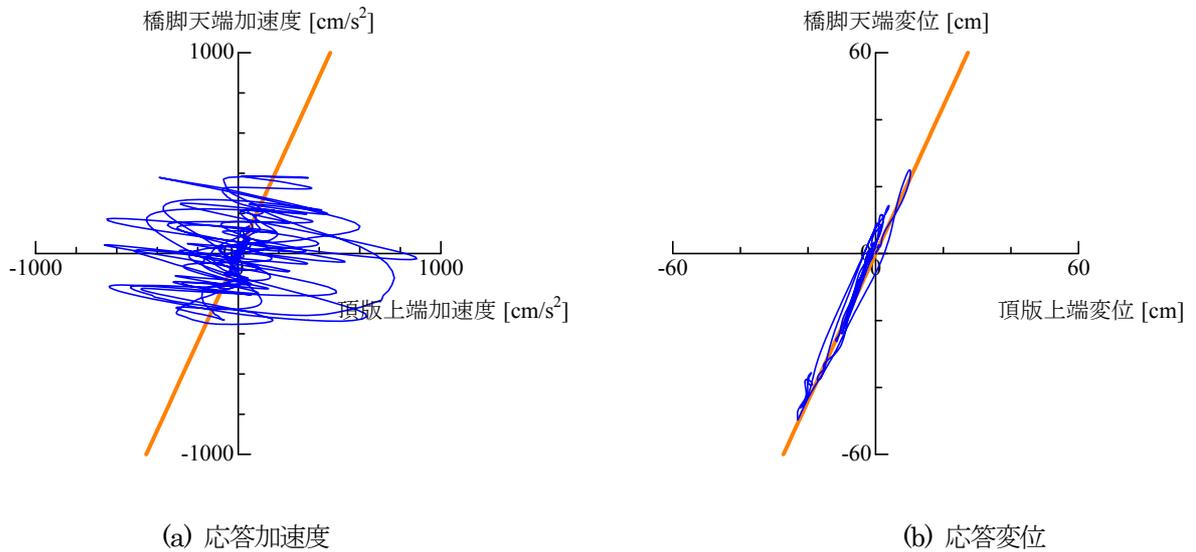


図-12 橋脚天端-頂版上端の応答加速度, 応答変位の関係 (非線形解析)

いえる。前述したが基礎-橋脚の変形には高次モードの影響はほとんど見られないために、全体系の地震時変形モードの再現を主眼においたプッシュオーバー解析では高次の影響を除外した状態で検討を行うことが妥当な結果を与えるものと考えられる。つまり、動的解析によって得られた各部材位置での変位の大小を前節の加速度比 $\alpha$ として考えたプッシュオーバー解析を実施することにより、高次の影響を無視することが出来ると推察される。

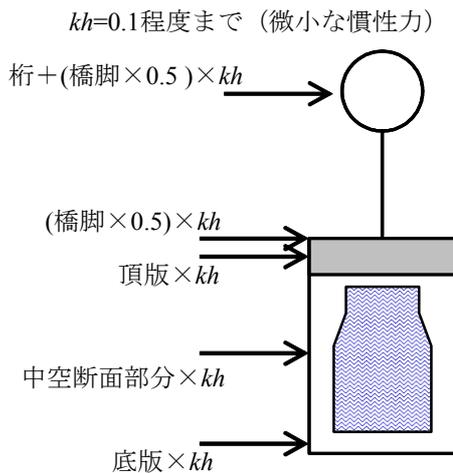
本節では上記の考察をさらに深度化させ、動的解析の代わりにプッシュオーバー解析によって橋脚、基礎の応答震度 (応答変位) 分布を推定し、これに基づいた地震時慣性力を作用させる手法の検討を行う。手法の概略的な流れを図-13に示す。

まず、Step 1として全要素に同一震度に相当する慣性

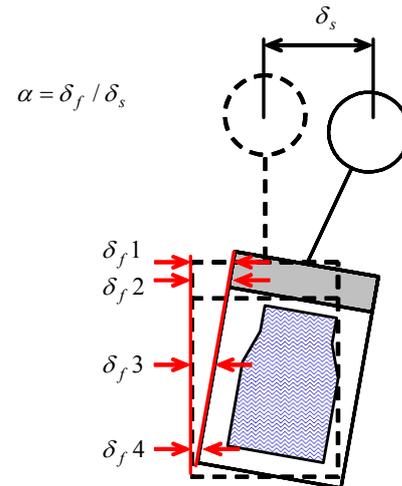
力を作用させたプッシュオーバー解析を実施する。ここで作用させる震度としては、構造要素が塑性化しても各要素の応答の比に差がないという上述の結果を元に、比較的小さな震度を考慮しておけば十分である (今回は震度  $K_h=0.1$  とした)。Step 2として、Step 1終了時の橋脚天端と各要素の応答変位の比 $\alpha$ をそれぞれ算定する。この $\alpha$ は応答変位の比であるが、前述の検討により、高次モードを無視した応答加速度の比と見なすことも可能である。そこで、Step 3として、3.1節と同様に応答変位の比 $\alpha$ を上部工と基礎の応答震度の比として扱い、震度比に従った慣性力を作用させる。これにより、基礎と橋脚の応答震度の違いを考慮したプッシュオーバー解析が可能になっていると考えられる。

本来は、Step 3の結果をもとに再度 Step 2の応答変位分布を求め、これが前回の Step 2の結果と等しいことを確

Step1 全要素に同一震度の慣性力を作用させる



Step2 基礎と上部工の変形量の比  $\alpha$  の算定



Step3 基礎慣性力  $\times \alpha$  を考慮して全慣性力を作用させる

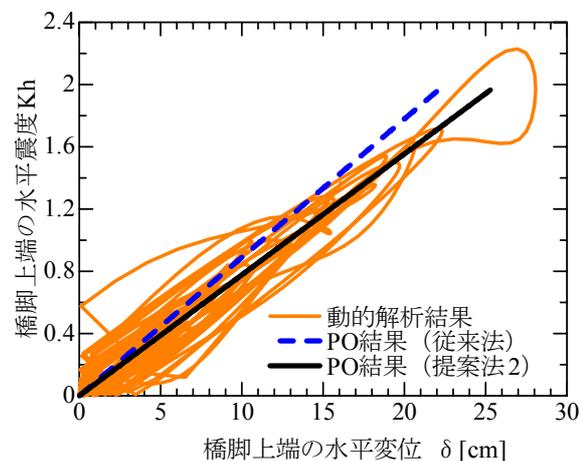
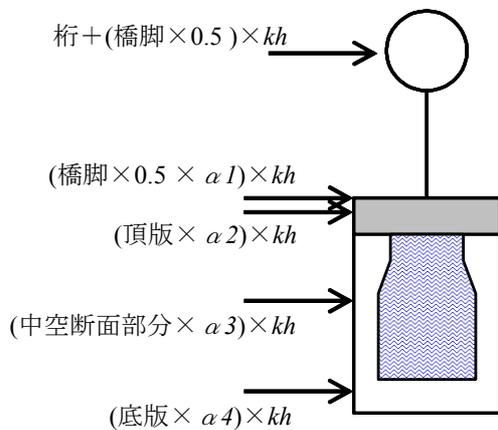


図-13 応答加速度に従ったプッシュオーバー解析の考え方 (提案法2: プッシュオーバー解析による応答変位分布を用いる場合)

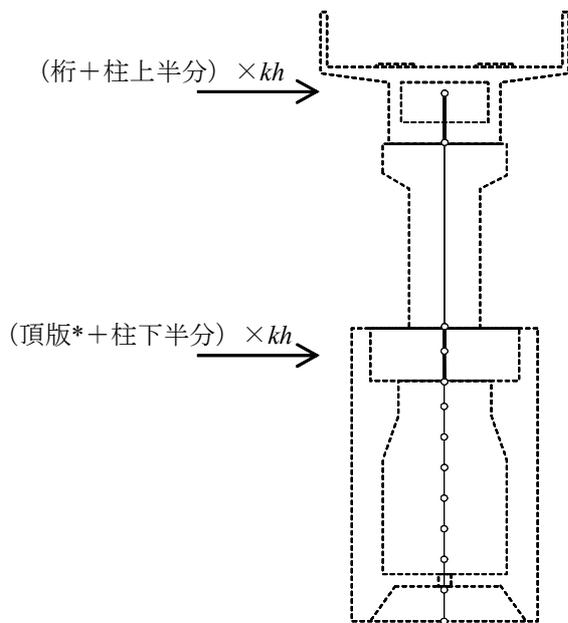
図-14 提案法2によるプッシュオーバー解析結果

認する必要がある。もし両者が異なる場合には、新たに算定した Step 2 の変位分布に従って再度 Step 3 を実施する。この作業を結果が収束するまで何度か繰り返し実行する必要がある。しかしながら、いくつかの試計算により、一度目の Step 3 の結果と収束計算を行った後の結果はそれほど大きく変わらないことが分かっているため、本手法において繰り返し計算は実施しないこととした。

本手法 (3.1 節の提案法 1 と分類するために提案法 2 と呼ぶ) を図-3 のモデルに適用して得られた結果を図-14 に示す。これより、提案法 2 を用いても地震時損傷過程や保有性能を精度よく推定できることが分かる。つまり、静的解析によって得られる構造物全体系の変形量分布の大小に従った形で慣性力を増減したプッシュオーバー解析を実施した場合においても、各要素の応答加速度の違いを表現可能であることが確認された。よって構造物の性能把握の手法として、動的解析+静的解析を

要する提案法 1 よりも簡便な静的解析+静的解析による提案法 2 が適用可能であることが示された。

また前述したが、図-11, 12 の橋脚天端と頂版上端の応答分布を見ると、変位と比較して加速度の結果は直線上に位置しているとは言い難く、この原因として高次モードの影響や、減衰の影響や数値積分の収束誤差の問題も含まれるのではないかと推測される。そのため瞬間的な加速度分布を用いる提案法 1 では、高次モードの影響により、結果にバラツキが生じる可能性がある。実際、図-10 に示した提案法 1 による結果を見ると、従来法と比較すると動的解析に近い荷重-変位関係を推定できているが、剛性を多少小さく推定してしまっている。これに対して、提案法 2 は高次モードの影響を比較的受けにくい変位分布に従って慣性力を考慮するために、安定した解を得られるものと考えられる。このことは、図-14 に示す提案法 2 の結果が、動的解析で得られた荷重-



\*有効質量で考慮

図-15 基礎頂板の慣性力のみを考慮したプッシュオーバー解析の考え方（簡易法）

変位関係とほぼ一致していることから確認できる。つまり、提案法1と比較して提案法2は簡便であるだけでなく、解析精度の面からも安定した解が得られる有効な手法であると考えられる。

#### 4. 設計における簡便な基礎慣性力の取り扱いに関する検討（簡易法）

前節の検討により、動的解析結果、プッシュオーバー結果による各要素の応答加速度分布、応答変位分布に従った全要素の慣性力を考慮することで、構造物の性能を高い精度で推定可能であることが示された。ここではさらに実際の設計を意識して、より簡便な慣性力の取り扱い方法について検討を行う。

図-1にあるように、杭基礎、直接基礎を有する構造物におけるプッシュオーバー解析では、フーチングの慣性力を有効重量で考慮している<sup>1)</sup>。有効重量とは、躯体の実重量から、施工前の現地盤の地盤重量を差し引いたものである。ケーソン基礎においても同様の手続きを経ることで合理的な地震時損傷過程や保有性能を算定できるとすれば、他の基礎形式との設計の連続性が計られるとともに、提案法2では二度の実行が必要であったプッシュオーバー解析が一度の実行で済むことになるので、設計時に容易なプッシュオーバー解析が可能となる。ただし本検討では、ケーソン基礎において、フーチングに相当する部分を頂版と読み替えることにする。本手法（簡易法と呼ぶ）によるプッシュオーバー解析の概念を図-15に、簡易法によって得られる結果を図-16に示す。図-16より、簡易法によってもある程度精度の高い

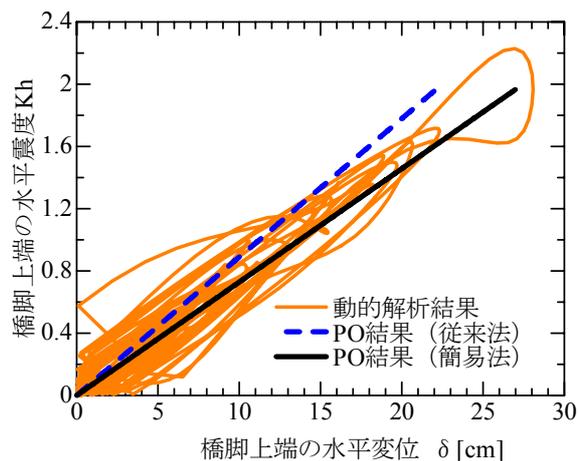


図-16 簡易法によるプッシュオーバー解析結果

荷重-変位関係を推定できることが分かる。

この原因を考察すると、以下の理由が考えられる。地盤の抵抗効果によって、基礎の応答震度が橋脚と比較すると非常に小さくなっていること、さらに地中深くなるにつれて震度が小さくなることが予想される。基礎頂版の有効重量を上部工と同一震度で作用させるという作業によって、この応答震度の違いを異なる視点から考慮出来ているために、正しい応答値を算定できたものと推察される。本検討における結果は1ケースの結果を示しただけに過ぎないが、これとは別に柱長さや桁重量、地盤剛性、要素の塑性化考慮などを変化させた複数のパラメータスタディーを実施している。これらの結果によっても簡易法は妥当な荷重-変位関係、地震応答値を算定することが確認されている。よって本手法を用いることにより、他の基礎形式と連続性を持った地震時慣性力の考え方に統一することが出来、さらに従来法よりも精度の高い構造物の性能把握が可能となると考えられる。

#### 5. まとめ

本検討では、ケーソン基礎の性能を正しく把握するための地震時慣性力考慮の方法について検討を行った。その結果、従来の基礎慣性力を無視したプッシュオーバー解析では正確な地震時性能を求められないこと、動的解析結果による構造物全体系の変形が最大となった瞬間の応答加速度に従って慣性力を作用させることにより、地震時性能を精度よく推定できることが分かった。さらに簡易法によるプッシュオーバー解析の提案を行い、手法の妥当性の確認を行った。具体的には基礎頂版の有効重量を上部構造と同一震度で作用させる方法である。この手法を用いてプッシュオーバー解析を行うことで、他の基礎形式と連続性を持った地震時慣性力の考え方となると共に、従来よりも精度の高い地震時性能を簡便に推定することが出来る。

## 参考文献

- 1) (財) 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，1999.
- 2) 例えば，Priestley, M. J. N., Seible, F. and Calvi, G. M., 川島一彦監訳：橋梁の耐震設計と耐震補強，技報堂出版，1998.
- 3) 西村昭彦，室野剛隆：所要降伏震度スペクトルによる応答値の算定，鉄道総研報告，Vol. 13, No. 2, 1999.
- 4) (社) 日本道路橋会：道路橋示方書・同解説（V 耐震設計編），2002.
- 5) 矢部正明，川島一彦：杭基礎の非線形地震応答解析とプッシュオーバーアナリシスによる解析法に関する研究，土木学会論文集，第 619 号/I-47, pp.91-109, 1999.
- 6) 室野剛隆・西村昭彦：地盤と構造物の動的相互作用を考慮した応答変位法，鉄道総研報告，Vol. 13, No. 2, 1999.
- 7) (財) 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）設計計算例（ケーソン基礎），2004.
- 8) (財) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説（基礎構造物・抗土圧構造物），丸善，2000.
- 9) 日本建築学会：入門・建物と地盤との動的相互作用，1996.
- 10) 原田隆典，久保慶三郎，片山恒雄：有効入力動の計算式とその実測例による検討，土木学会論文集，第 362 号/I-4, pp.435-440, 1985.
- 11) 室野剛隆，齊藤正人，西村昭彦：地盤の不整形性および構造物への有効入力動の評価，鉄道総研報告，第 13 巻，第 2 号，pp. 23-28, 1999.
- 12) 白戸真大，福井次郎：レベル 2 地震動下における有効入力動の評価，第 26 回地震工学研究発表会講演論文集，pp.873-876, 2001.

(2009 年 9 月 24 日受付)