

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

室野 剛隆* 坂井 公俊*

Effects of High Frequency Ground Motion on Seismic Design of Bridges and Viaducts

Yoshitaka MURONO Kimitoshi SAKAI

Recently earthquake ground motions with high frequency components have been often observed. It is well known that an effective input motion is reduced in high frequency range due to the effect of the Kinematic interaction of soil-pile system. Dynamic soil-pile interaction analyses, therefore, were conducted by varying the conditions of both grounds and piles, and the influences for input loss of pile foundation were investigated. The analysis result clarified that the input loss was negligibly small for the ground motion whose amplitude predominated in 1 ~ 2 Hz such as in the case of the Hyogoken Nanbu earthquake. On the other hand, the input loss was quite large on the high frequency seismic motion such as the ground motion observed in the Tohoku earthquake. The simplified expression of input loss, which could be used in the seismic design practice, was prescribed by based on the Winkler-type spring model.

キーワード：短周期地震動，動的相互作用，有効入力動，入力損失

1. はじめに

1995年兵庫県南部地震以降，防災科学技術研究所の強震観測網 K-NET, KiK-net¹⁾などの地震観測網が整備され，膨大な強震記録が蓄積され始めた。その中で，2003年の三陸南地震や2008年の岩手・宮城内陸地震などでは，短周期成分が非常に卓越するとともに，大加速度を有する地震動が観測されている。また，2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震では，最大加速度が1000galを超える強震動を記録した地点が約20箇所もあった。これらの記録の多くは短周期成分が卓越しており，特にK-NET築館では最大加速度が約3000gal，加速度応答スペクトルは5000gal近くになる極めて強い揺れであった。

ところが，各種の耐震設計基準で規定されている標準的な設計地震動の加速度応答スペクトル^{2), 3)}は，概ね0.5秒よりも長周期側で多くの観測記録を包絡するレベルに設定される一方で，短周期領域についてはある閾値でカットされることが多い。短周期側で観測記録の加速度応答スペクトルよりも小さく設定される背景には，土木構造物の固有周期が0.5～1.0秒程度のものが多いことや，短周期側では逸散減衰を大きく見積もることが可能であること，Kinematic相互作用（基礎が存在することで地盤の動きが変化すること）による入力損失が期待できることなどを期待した工学的判断であると言われている。しかし，定量的な検討がされた事例はない。そこで，本報では，短周期地震動の特性を解明するとともに，

短周期成分が構造物の応答に与える影響を，動的相互作用の観点から明らかにする。特に，検討事例が少ない群杭基礎を対象として定量的に評価することを試みた。

2. 近年の短周期成分が卓越した地震動

短周期成分が卓越した地震記録の例を図1に示す。なお，これらの図にはL2地震動の標準応答スペクトル（スペクトルII，G1，G3地盤）も併せて記載しているが，いずれの地点においても短周期で標準応答スペクトルを大きく上回っている。これらの結果より，短周期成分の大きな記録は，ある特定の地震，地震規模，地点において発生するのではなく，様々な地震において全国にわたって観測されていることが分かる。

そこで，これらの短周期成分の卓越した地震動が発生

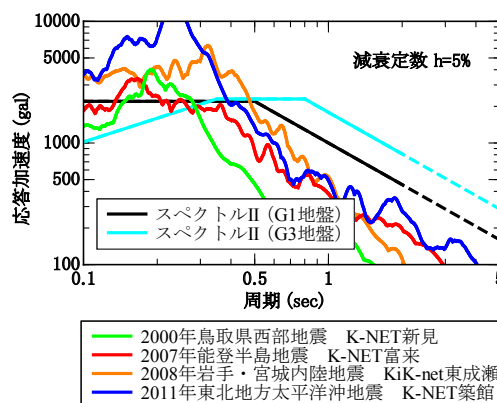


図1 短周期の卓越した地震動とスペクトルIIの比較

* 構造物技術研究部 耐震構造研究室

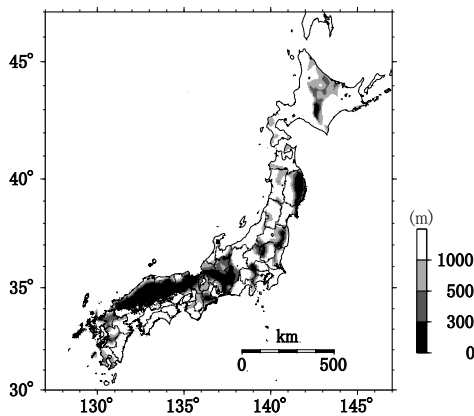


図2 全国の地震基盤深度⁵⁾

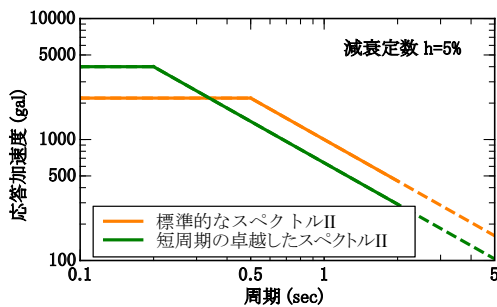


図3 短周期の卓越したスペクトルII (G1 地盤)

する要因について考察するために、観測地点の地震基盤 ($V_s=3000\text{m/s}$ 程度の岩盤) までの深度を調査したところ、短周期の大きな地震動は、地震基盤深度が概ね 500m より浅い地点で発生していることが明らかとなっている⁴⁾。そのため新たに改訂された鉄道構造物の耐震設計標準²⁾では、地震基盤の浅い地域(図2の白塗りの地域を除く地域)において等価固有周期が0.3秒よりも周期の短い橋梁を設計する場合には、標準応答スペクトルに加えて短周期成分の卓越した地震動(図3)も用いることが示されている。

そこでこれら短周期成分の卓越した地震動が橋梁等の構造物に与える影響について次章以降で検討を行う。

3. 動的相互作用解析による入力損失評価

3.1 定式化

群杭の解析は煩雑であることはよく知られており、それを精緻に評価する手法⁶⁾などが提案されている。しかし、近年の鉄道構造物の多くは杭本数が1フーチングに1~4本程度、杭間隔 $s/d=2.5\sim 3$ のものが多く、この範囲では、Konagai らの方法(等価梁による方法)が良い近似解を与えることが分かっており⁷⁾、ここで等価梁法を採用した。この手法は群杭を等価な梁(Equivalent Single Beam)に置き換えて考えるものである。この手法を用いると、等価梁の運動方程式と地盤の運動方程式を重ね合わせることで、地盤~基礎系の全体系の運動方程式が以下のように得られる。

$$([\mathbf{R}_H] + [\mathbf{F}_H] - \omega^2 [\mathbf{M}_H]) \begin{Bmatrix} \{v_r\} \\ \{v_z\} \end{Bmatrix} = \{P\} \quad (1)$$

ここに、 $[\mathbf{F}_H]$ は等価梁全体の剛性マトリクス、 $[\mathbf{M}_H]$ は質量マトリクス、 $[\mathbf{R}_H]$ は杭基礎と同一寸法・形状の切り欠き地盤の壁面の力と変位の関係を表すマトリクスで、ここでは、半解析解である薄層要素法⁸⁾により表現した。また、 $\{P\}$ は外力ベクトルである。 $\{v\}$ は変位ベクトルで、添え字 r は半径方向、 z は鉛直方向成分を表す。

次に、地盤中に杭基礎と全く同一の寸法・形状を有した仮想土柱を考える。自由地盤の変形 $\{v_r^*\}$ が作用した場合(鉛直変位は無視)、その仮想土柱は自由地盤と同一の変形をする。仮想土柱を杭に置き換えると、剛性および質量は土柱の分だけ低減されるので、等価梁の剛性マトリクス $[\mathbf{F}_H]$ は $[\mathbf{F}_H^*]$ に、質量マトリクス $[\mathbf{M}_H]$ は $[\mathbf{M}_H^*]$ に変化する。ただし、剛性 $[\mathbf{F}_H]$ の変化は一般に小さいので無視する。剛性 $[\mathbf{F}_H]$ および質量マトリクス $[\mathbf{M}_H^*]$ を有する杭基礎の存在により、杭の変形は自然地盤の変形 $\{v_r^*\}$ に追従せず、その変形は $\{v_r\}$ だけ変化する。その結果、基礎と地盤の接触面上で以下の関係が成り立つ。

$$([\mathbf{F}_H] - \omega^2 [\mathbf{M}_H^*]) \begin{Bmatrix} \{v_r\} \\ \{v_z\} \end{Bmatrix} = -[\mathbf{R}_H] \left(\begin{Bmatrix} \{v_r\} \\ \{v_z\} \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} \{v_r^*\} \\ \{0\} \end{Bmatrix} \right) \quad (2)$$

式(2)を解くことにより、Kinematic 相互作用による地盤変位 $\{v_r\}$ 、 $\{v_z\}$ が求められる。なお、紙面の都合で定式化の詳細は省略するので、文献7)を参考にされたい。

Kinematic 相互作用により生じる杭頭変形と自由地盤の地表面の変形の比率

$$\eta = \frac{v_{r,1}^* + v_{r,1}}{v_{r,1}} \quad (3)$$

を有効入力係数 η とする。また、 $1 - \eta$ を入力損失と呼び、実際に構造物に入射される地震動の自由地盤からの低減率を意味する。ここに、下添え字の1は各ベクトルの1列目の値を表す。なお、式(3)は虚数で求まるが、このままでは物理現象として理解しづらいので、以下の考察では、有効入力動として振幅 $|\eta|$ と位相 ϕ の関係で整理する。

$$|\eta| = \sqrt{\Re^2(\eta) + \Im^2(\eta)} \quad (4a)$$

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{\Im(\eta)}{\Re(\eta)} \right) \quad (4b)$$

3.2 解析条件

鉄筋コンクリートの場所打ち杭を対象とした。杭は先端支持杭を想定し、杭頭はフーチングに剛結されているとした。解析には、薄層要素法を用いることから、線形計算が前提となるが、L2地震時には地盤が塑性化することは避けられない。そこで、等価線形化法と同様の考

表1 解析パラメータ

Case	杭諸元				地盤諸元		
	杭径 $D(m)$	杭間隔 $s(m)$	杭本数	杭長 $l(m)$	初期 せん断波 速度 $V_{s0}(m/s)$	ポアソン比 ν	層厚 $H(m)$
2	1.0	3.0	2×2	15	270 200 130	0.45	15
3	1.5	4.5	2×2	15	270 200 130	0.45	15
4	1.0	3.0	2×2	10	270 200 130	0.45	10
5	1.0	3.0	2×2	30	270 200 130	0.45	30
6	1.0	3.0	3×3	15	270 200 130	0.45	15
7	1.0	3.0	4×4	15	270 200 130	0.45	15

※ V_{s0} の変化は、Case2-1, Case2-2 のように枝番で表記する

え方に基づき、初期せん断波速度 V_{s0} については微小ひずみ時の値から低下させるとともに、減衰定数については履歴減衰の分だけ増大させた。具体的には、せん断波速度 V_s については、 V_{s0} を 0.75 倍した値²⁾ を、減衰定数 h については 10% とした値を解析に用いた。解析パラメータおよび解析ケースを表1に示す。なお、杭の弾性係数は RC 杭を想定して、 $Ep=2.5 \times 10^7 \text{kN/m}^2$ とした。

入力地震波は、多くの耐震設計の基準の中で、設計地震動を設定する際に強く参考にされている 1995 年兵庫県南部地震の神戸海洋気象台で観測された記録 (KOB 波) および、短周期成分が著しく卓越する 2008 年岩手宮城内陸地震における一関西における記録 (IWT 波) の 2 種類を用いた。図4に、波形とフーリエ振幅スペクトルを示す。KOB 波では、多くの耐震設計基準で対象としてきた 1~2Hz 前後の成分が卓越しており、5Hz 以上の成分は十分に小さい。一方、IWT 波では、5Hz 以上の高い振動数成分が卓越している。

3.3 解析結果

Case2 (4本杭: $D=1.0$), Case3 (4本杭: $D=1.5$) に対して、式(4a)で定義される有効入力係数の振幅 $|\eta|$ を算出した結果を図5に示す。振幅 $|\eta|$ は低振動数側では 1.0 であるが、ある振動数から低下し、入力損失効果が見られる。入力損失効果は、杭径が大きいほど、地盤が軟弱なほど顕著である。一方、位相 ϕ を図6に示す。振動数が高くなるに従い位相差が大きくなり、また、位相 ϕ はほぼ正で得られており、有効入力位相は進んだ状態、つまり、入射進行波が自由地盤の地表よりも早く杭頭に到達することを意味している。なお、紙面の都合で図は省略するが、杭長の影響については、杭長が短いほど入

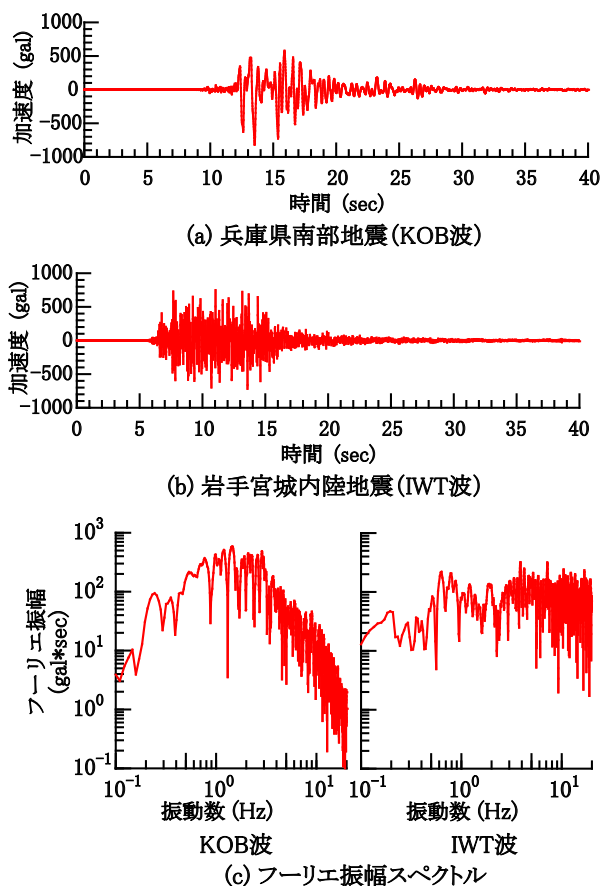


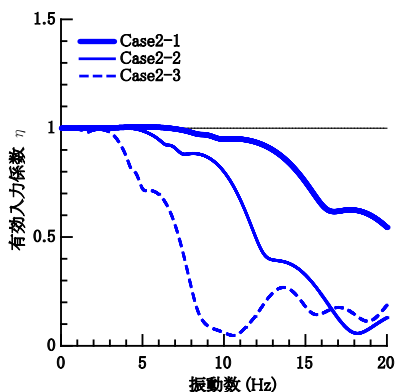
図4 基本検討に用いた地震動

力損失が大きくなる傾向がある。また、杭本数については、杭本数が多いほど有効入力係数 $|\eta|$ の低下傾向が大きい。

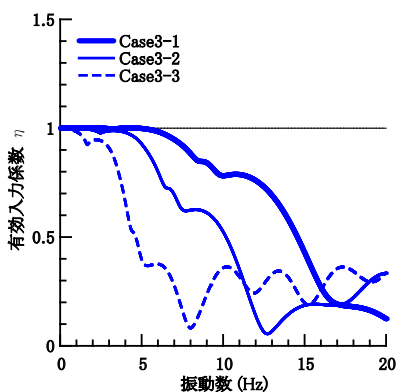
振動数が高くなると、杭長に対して波長が相対的に短くなることから、杭の深さ方向の挙動には位相差が生じ、その結果として杭は周辺地盤の変形を拘束し、これを平均化しようとする働きにより、入力損失が発生することが分かっている。つまり、上記のような特性は、杭径が大きいほど、杭長が短いほど、地盤が軟らかいほど、杭本数が多いほど、地盤に対する基礎の相対的な剛性が大きく、基礎の存在が地盤の挙動を拘束する効果が大きいいため、入力損失効果が大きくなったと解釈できる。

3.4 入力損失が加速度応答スペクトルに与える影響

入力損失を考慮することにより、構造物の応答がどの程度影響を受けるのか検討する。そこで、有効入力係数を地表面地震動のフーリエスペクトルに乗じて、それを逆フーリエ変換することで有効入力動を算出し、有効入力動に対して応答スペクトルを算出した。その結果を図7に示す。兵庫県南部地震のように、元々の地震波に高振動数成分が少ない場合には、入力損失による影響はほとんど現れない。しかし、岩手内陸地震のように高振動数成分が多く含まれる地震動に関しては、高振動数成分の入力損失効果が有効に作用して、短周期の構造物の応答を低減させている。



Case2:4本杭(杭径D:1.0m)



Case3:4本杭(杭径D:1.5m)

図5 杭径の違いによる有効入力係数(振幅)の違い

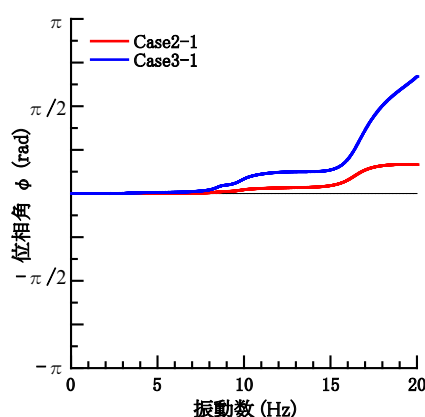
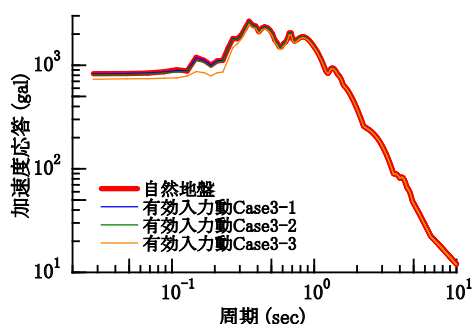
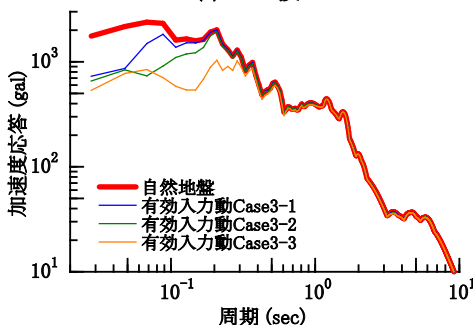


図6 有効入力係数の位相



(a) KOB波



(b) IWT波

図7 有効入力を考慮した場合の応答スペクトル

これまで、杭基礎の入力損失は、構造物の応答にはそれほど大きな影響はなく、設計という観点で見た場合には、ある種の安全率としてとらえるべきと解釈されることが多かった。KOB波を対象とした場合には、今回の結果は従来の結果と調和的であり、これまでの考え方を支持するものとなった。しかし、IWT波などの短周期成分が卓越する地震動を対象とした場合には、この影響を無視できないレベルであると言える。近年の短周期が非常に卓越した地震動に対しては、幾何学的相互作用としての入力損失を考慮しないと、不合理な設計になることが示唆された。

東北地方太平洋沖地震では、最大加速度が1000galを超える強震動を記録した地点が約20箇所もあったにもかかわらず、土木構造物が振動により壊滅的な被害を受けた事例は限定的であった。これは、耐震補強が着実に実施されていたこと、構造物の周期帯域と地震動の卓越

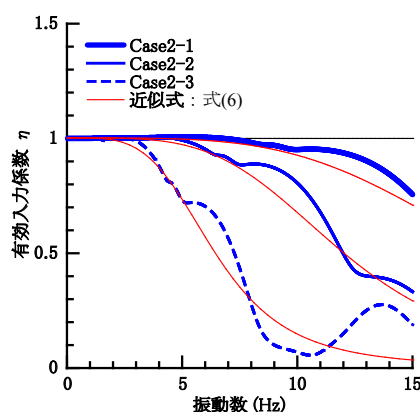


図8 近似式の適用性 (Case2 シリーズ)

周期とずれていたことなど、いくつかの要因が考えられるが、このように入力損失効果が構造物への入射波を減じたことも1つの要因であったと思われる。

4. 実用的な有効入力係数モデルの提案

4.1 有効入力係数の近似的評価

杭基礎の入力損失効果を設計実務の観点から理解するために、ここでは弾性床土上の梁モデルを用いた簡易計算を行う。杭-地盤系の内部に減衰を無視すると、このときの支配方程式は、

$$E_p I_p \frac{\partial^4 u}{\partial z^4} + k_H B (u - u_g) = -\rho_p A \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (5)$$

ここに、 $E_p I_p$ は杭の曲げ剛性、 ρ_p は杭の密度、 B は杭の載荷幅、 A は杭の断面積、 k_H は地盤反力係数である。上記の特解項のみを採用するとともに、有効入力動の定義に従い杭体の質量を無視すると、地表面の振幅 U_g に対する基礎の変位 U の比率は、

$$\frac{U}{U_g} = \frac{1}{1 + \frac{1}{4} \left(\frac{\omega}{\beta V_s} \right)^4} \quad (6)$$

となる。ここに、 β は杭の特性値である。式(6)で表わされる U/U_g は有効入力係数 η に相当すると考えられる

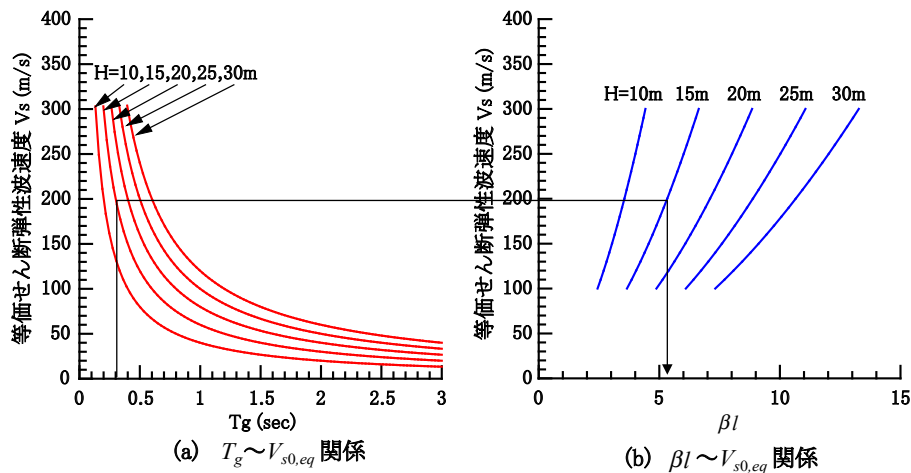


図9 有効入力係数モデルを用いるための補助プロセス

ので、各ケースについて式(6)と3章の動的相互作用解析から得られた有効入力係数式(4)との適合性を調べた。なお地盤反力係数 k_H として Vesic の式を採用した。結果の例を図8に示す。0Hz から 10Hz 程度までは両者の結果は概ね一致している。ただし、10Hz 以上の高振動数側では、動的相互作用解析で得られた有効入力係数 η は下げ止まるとともに変動するのに対して、式(6)ではゼロに収束するので、一致度が悪くなる。式(6)で近似する場合には、少なくとも何らかの下限值が必要であると言える。

4.2 簡易な有効入力係数モデルの提案

一般には層厚が 10m から 30m 程度の場合が多く、支持杭が使われることが多い。この場合、杭長 l と表層厚 H は概ね一致するので、 $l=H$ とできる。地盤の固有周期 T_g は $T_g=4H/V_{s0}$ となるが、地震時には、地盤の塑性化が考えられるので、地盤のせん断弾性波速度は低下する。その低下度合いを耐震設計標準では、 $V_s=a \cdot V_{s0}$ としている²⁾。これらの関係を式(6)に代入すると、

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{1}{64} \left(\frac{\pi(T_g/\alpha)}{\beta l} \right)^4 \cdot f^4} \quad (7)$$

が得られる。本研究では、簡易な有効入力係数モデルとして式(7)を提案する。ただし、先に言及したように、この式では振動数が大きくなると値がゼロに収束するため、何らかの下限值が必要になる。下限値については、地盤条件と杭条件により決定されると思われるが、今回の論文では定式化するまでには至っておらず、ここでは一律 0.4 と設定した。

設計実務においては、まず土質調査結果から耐震設計上の基盤面を決定し、層厚 H および初期せん断波速度 V_{s0} から地盤の固有周期 T_g および地盤種別を決定する。一般に実地盤は多層になっているので、式(7)の提案モデルを用いるためには、地盤を等価な 1 層地盤に置換す

る必要がある。そこで、地盤の固有周期が等しくなるように等価せん断弾性速度 $V_{s,eq}$ を図9(a)から算定する。この図は単純な 1/4 波長則から求まる $T_g \sim V_{s,eq}$ 関係を図化したものである。次に、この $V_{s,eq}$ を用いて図9(b)から βl を算出する。この図は、式(6)から βl と $V_{s,eq}$ の関係を図化したものである。ただし、杭径 D については、近年の杭径が 1.0 ~ 1.5m のものが多いことから、 $D=1.0m$ とした。地盤の固有周期 T_g と上記のプロセスにより得られた βl を用いると式(7)の提案モデルから有効入力係数を簡易に算定することができる。

4.3 提案モデルを用いた構造物の非線形応答の評価

有効入力係数を提案モデルによって評価した例を示し、短周期の卓越した地震動が構造物の応答に与える影響を考察する。検討に用いる地震動としては、図10に示す G3 地盤における標準的なスペクトル II と短周期成分の卓越したスペクトル II の 2 波とする。これらは、図3のスペクトル II を入力として地盤応答解析を行った結果得られた地震動の応答スペクトルである。

地盤の固有周期 $T_g=0.375s$ (G3 地盤の中間的な固有周期)、等価せん断弾性波速度 $V_{s,eq}=250m/s$ とすると、図9より $\beta l=7.541$ が得られる。ここで剛性低下係数 α は耐震設計標準に従い 0.50 とする。これらを式(7)に代入することで、有効入力係数 η が簡易に算定される。得られた有効入力係数 η を図11に示す。さらにこの有効入力係数を各波形のフーリエ振幅に乗じることで得られる修正波形の弾性加速度応答スペクトルも図10に記載してある。これらの結果より、有効入力を考慮することで、標準的なスペクトル II、短周期の卓越したスペクトル II とともに、周期 0.3 秒程度よりも短周期側で応答が小さくなっている。さらにその低下度合いは短周期の卓越したスペクトル II の方が顕著であり、図7における結果と調和的な傾向を示している。

実際の構造物は大規模地震時には非線形応答を示す。

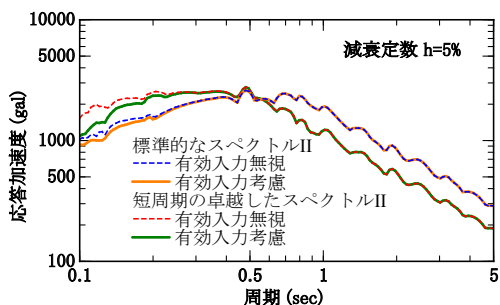


図 10 提案モデルによる有効入力を考慮した応答スペクトル (G3 地盤)

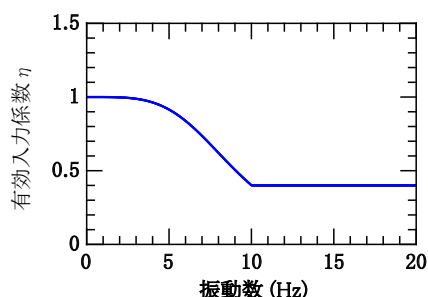


図 11 提案モデルによって評価される有効入力係数

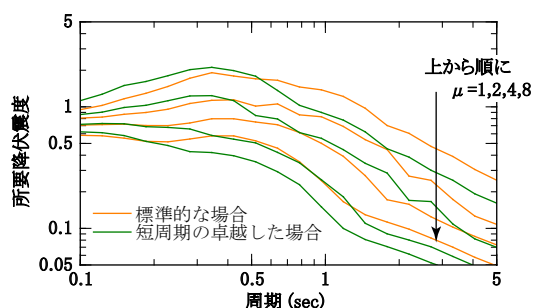


図 12 有効入力を考慮した所要降伏震度スペクトル

そこで、これらの地震動に対して所要降伏震度スペクトルを計算することで、実際の構造物に与える影響を評価する。得られた所要降伏震度スペクトルを図 12 に示す。まず周期 0.5 秒程度よりも長周期側では、標準的なスペクトル II の方が大きな応答を示しており、図 10 の傾向と調和的である。一方で弾性応答時には周期 0.5 秒よりも短周期成分において短周期の卓越したスペクトル II の応答が大きくなっていたが、図 12 の応答塑性率 $\mu=4,8$ の結果を見ると、短周期成分においても両波形の結果は概ね等しい値を示している。これは、構造物が非線形化することで長周期化し、地震動のより周期の長い成分の影響が強くなったため、短周期成分において強いパワーを有する地震動の影響度が低くなったものと考えられる。つまり、短周期成分の大きな地震動は、元波形を用いた弾性加速度応答スペクトルにおいては非常に大きな応答を示すものの、有効入力動、非線形応答の影響を考慮することで、実際の構造物に与える影響は限定的であることが確認された。

5. おわりに

近年の地震では短周期が卓越した地震動が多く観測されていることから、Kinematic 相互作用による入力損失に着目して、構造物の応答がどのように変化するか検討するとともに、簡易な有効入力係数モデルを提案した。主な成果を以下に示す。

- (1) 杭基礎の径が大きいほど、地盤が軟弱なほど、杭長が短いほど、地盤に対する基礎の相対的な剛性が高く、地盤挙動を拘束する効果が大きいため、入力損失効果は大きい。
- (2) 従来の耐震設計で考えているような 1 ~ 2Hz が卓越するような地震動に対しては、入力損失効果は無視できる程度であるが、近年の短周期成分が卓越した地震動に対しては、入力損失効果が無視できない。
- (3) 耐震設計実務で、入力損失効果を見込むために、弾性床上の梁モデルを前提とした有効入力係数モデルを提案した。これにより、合理的に設計実務に適用可能である。

謝辞

短周期成分が卓越した地震動の例として、防災科学技術研究所の強震観測網 K-NET および KiK-net で得られた記録を用いた。ここに感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 防災科学技術研究所 強震観測網 (K-NET, KiK-net), <http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/>
- 2) 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，丸善出版，2012
- 3) 道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，1996
- 4) 坂井公俊，室野剛隆，佐藤勉：近年の地震記録に基づいた L2 地震動の考え方とその設定方法，鉄道総研報告，第 25 巻，第 9 号，pp.5-12，2011
- 5) 藤原広行ほか：強震動評価のための全国深部地盤構造モデル作成手法の検討，防災科学技術研究所研究資料，第 337 号，2009
- 6) 長谷川正幸，中井正一：杭基礎の有効入力に関する基礎的研究，日本建築学会構造系論文集，第 422 号，pp.105-115，1991
- 7) Kazuo Konagai : An Upright Single Beam Equivalent to Grouped Piles, 生産研究 50 巻 9 号, PP.13-16, 1998.
- 8) H. Tajimi : A Contribution to Theoretical Prediction of Dynamic Stiffness Surface foundation, Proc. of 7th WCEE, Vol.5, pp.105-112, 1980.