杭基礎による入力損失効果の 実務的評価手法の提案

寶地 雄大¹・室野 剛隆²

¹正会員 (公財) 鉄道総合技術研究所 (〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)

E-mail: hochiyudai.65@rtri.or.jp

²正会員 (公財) 鉄道総合技術研究所 (〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)

E-mail: murono.yoshitaka.51@rtri.or.jp

地盤・基礎系の動的相互作用の影響による入力損失を耐震設計に考慮することで、合理的な構造設計が可能となる。しかし、鉄道構造物に多用されている杭基礎構造物について、耐震設計における静的解析法に入力損失を考慮するための実務的な手法はない。そこで、本検討では、杭基礎による入力損失を静的解析法に導入可能な手法を検討した。検討では、地盤、杭基礎諸元を変化させた感度解析を行うことで入力損失の特性を把握した。次に、応答変位法による入力損失の評価手法およびランダム振動論を用いた入力損失を考慮した所要降伏震度スペクトルの簡易な低減手法を提案し、その適用性について検証した。

Key Words: input loss, effective input motion, kinematic interaction, seismic deformation method

1. はじめに

ケーソン基礎や杭基礎構造物に支持される構造物では、地盤・基礎系の動的相互作用の影響による入力損失が生じることが一般に知られている。入力損失に関して、剛性が高く、周辺地盤を拘束する効果が大きいケーソン基礎等の大型基礎について、これまで実験的・解析的に様々な検討がされ¹⁾²⁾など、基礎構造物による入力損失効果があることが分かっている。この入力損失を耐震設計に考慮することで、実現象に即した合理的な耐震設計が可能となる。そのため、鉄道の耐震基準³⁾では入力損失を設計に考慮可能であることが示されている。

一方、土木構造物の耐震設計における地震応答解析法は、動的解析法と静的解析法に大別される。動的解析法においては、地盤・基礎系の動的相互作用効果を表現できるような地盤・構造物一体型のモデルを用いることで、入力損失は自動的に反映される。この手法は、複雑な地震時挙動を表現できる反面、設計技術者には動的解析に関する多くの知識や経験が要求される。また、鉄道や道路で採用される高架橋や橋梁は比較的単純な形状のものが多く、振動モードも単純なものが多い。そのため、長大橋梁や斜角を有する橋りょうなど、特殊な条件を伴う場合を除き、動的解析法は一般的な設計実務には用いられない。

一方で、静的解析法は、地震による影響を慣性力や地盤変位といった静的な荷重に置き換えて、応答値を算定することになる。例えば、鉄道においては³⁾、所要降伏震度スペクトル（非線形応答スペクトル）を用いることで、構造物の非線形応答値を算定している。道路では⁴⁾、弾性加速度応答スペクトルとエネルギー一定則を組み合わせることで非線形応答値を算定している。いずれも、予め与えられた設計応答スペクトルから応答値を算定しており、現在の設計実務において主流となっている。このような静的解析法は、1次モードが卓越するような比較的単純な構造物については適用性が高い。しかし、静的解析法において入力損失を合理的に評価する手法はなく、耐震設計実務においては、入力損失の影響は陽な形で考慮されていないのが現状にある。“陽な形”の意味については2章で述べる。

このような、問題に対して齊藤・西村⁵⁾は、弾性波動理論から入力損失を含んだ地震動、すなわち、有効入力動の理論解を導くとともに、所要降伏震度スペクトルへの導入手法を提案している。ただし、この手法はケーソン基礎を対象としており、鉄道構造物に多用されている杭基礎を対象としたこのような手法はなく、検討の余地がある。また、地盤や構造条件に対して、より適用範囲が広い手法が望まれる。

そこで、本研究では、杭基礎構造物による入力損失を

静的解析法に導入可能な手法を検討する。検討は初めに、地盤条件、杭基礎の諸元を変化させた感度分析を行うことで、地盤条件および杭基礎の諸元が入力損失に与える影響を把握する。次に、質点系モデルによる入力損失の評価に関して、その解析精度の検証を行う。さらに、応答変位法による入力損失の評価手法およびランダム振動論を用いた入力損失を考慮した所要降伏震度スペクトルの簡易な低減手法を提案し、その適用性について検証する。

2. 入力損失効果を考慮する意義

1995年兵庫県南部地震以降、地震観測網が整備され、地震が発生するたびに貴重な強震記録が多数得られるようになった。2003年には三陸南地震が発生し、短周期側で5%減衰の加速度応答スペクトルが2000(gal)を上回る記録が観測されている。2008年には岩手・宮城内陸地震が発生し、一関西では短周期側で5%減衰の加速度応答スペクトルが5000(gal)にも達している。そして、東北地方太平洋沖地震では、岩手県沖から茨城沖までの南北約450km、東西約200kmの広いプレート境界で大きなずれが発生し、ほぼ日本全域で有感となり、宮城県栗原市で震度7、宮城県、福島県、茨城県、栃木県で震度6強など広い範囲で強い揺れを観測した。防災科学技術研究所の強震観測網K-NET、KiK-net⁶⁾では、最大加速度が1,000galを超える強震動を記録した地点が約20箇所もあった。また、短周期成分が卓越しており、特にK-NET築館では、周期0.2秒の5%減衰加速度応答スペクトルは5,000galに及んでいた。このように近年では、鉄道³⁾や道路⁴⁾の耐震設計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を短周期側で大幅に超える記録が多数観測されている。

ところで、これらの標準的な設計地震動の加速度応答スペクトルは観測記録をベースに決められていることが多い。その際には、概ね0.5秒よりも長周期側では多くの観測記録を包絡するレベルに振幅が設定されているが、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ようである⁷⁾など。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、幾何学的相互作用(Kinematic相互作用)による入力損失があること等を期待した工学的判断であると言われている⁷⁾。

短周期成分が設計地震動を越えた近年の地震動でも、構造物の揺れによる被害は限定的であることから、上記の工学的判断は正しいと言える。しかし、設計地震動

の中にこのような動的相互作用の結果として得られる減衰特性や入力損失を陰に含めてしまうことは、性能設計を前提とした設計体系下では不都合である。ISO 23469⁸⁾では、人間活動に依らない自然現象と、設計行為との境界を明確化するために、新たに「参照地震動」という概念を導入し、上記のことをより明確に主張している。実際に設計計算のときに構造物モデルに作用させる力、変位、ひずみなどの「地震作用」の値は計算に用いる構造物モデルや解析法に依存するので、これらに依存しない自然現象としての地震動のうち地震作用を評価する際に“参照”される地震動を「参照地震動」と呼び、これを先に評価することとしている。

例えば、解析手法として非線形スペクトル法⁹⁾や保有水平耐力法⁴⁾などの静的解析法を採用した場合には、「地震作用」としての慣性力を構造物の「応答」としての加速度応答スペクトルから算定するので、従来のように設計地震動(加速度応答スペクトル)に動的相互作用としての効果が含まれていても構わない。しかし、動的解析法を用いた場合には、入力損失効果などは動的相互作用の結果として自動的に考慮させるため、解析に用いる設計地震動は自然現象としての地震動でなければならない。つまり、自然現象としての地震動と設計に用いる地震作用とは区別して用いなければならない。

以上のように、性能設計が前提とされる現在においては、自然現象としての地震動が短周期成分で卓越するのであれば、それをそのまま設計地震動(参照地震動としての設計地震動)として設定し、入力損失効果などは地震作用を設定するプロセスの1つとして、設計地震動を決定するプロセスとは分離する必要がある。

そこで、本論文では、設計実務の中で、入力損失効果を定量的に評価できる手法を提案するものである。

3. 杭基礎による入力損失

杭基礎の入力損失効果については、既に既往の研究¹⁰⁾などで議論がなされているが、4章以降の議論でも重要な観点になるので、ここでは、鉄道構造物を念頭に、再度、その特性について概観する。

(1) 解析手法の概要

杭基礎構造物のうち、群杭基礎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¹¹⁾などが提案されている。一方で、何らかの仮定を与えることで、定式化を簡素化している手法もいくつか提案されている¹²⁾¹³⁾¹⁴⁾など。その多くは、杭本数や杭間隔について適用範囲がある場合が多い。そこで、本検討では、鉄道構造物において一般的な群杭基礎を対象に、良い近似解が

与えられることが分かっている等価梁法¹³⁾¹⁴⁾を採用した。この手法は群杭を等価な梁に置き換えて考えるものである。詳細は文献¹⁴⁾を参考にされたいが、ここでは、本検討における等価梁の計算において仮定した条件を以下に示す。また、その概要図を図-1に示す。

- ・群杭は変形時に杭間隔を変えず、杭の間に挟まれた土とともに変形する
- ・杭間に挟まれた土から杭に作用する摩擦力によって生じるモーメントは無視する
- ・杭頭は剛なフーチングに剛結されている
- ・地盤・杭は水平に分割された要素からなる。各要素の端面と杭の中立軸が交わる点は、同一平面上にある

また、地震波の伝播の表現は、水平方向に半無限の広がりを持つ成層地盤を仮定し、地盤中の地震波動場を良好に表現できる薄層要素法¹⁵⁾を用いることとした。

本解析モデルにおいて、基盤への地震波の入力を考慮した解析を行い、自由地盤における地表面の変位に対する杭頭変位の比で表される有効入力係数 η を算出することで杭基礎による入力損失の評価を行う。なお、解析では動的相互作用のうち幾何学的相互作用の影響のみを考慮するため、杭基礎構造物の重量を無質量とし、慣性の相互作用の影響を取り除いている。

(2) 解析条件

検討に用いた杭基礎および地盤の条件を図-2に示す。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条件とした。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え方にに基づき、初期せん断波速度 V_s 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加させた。具体的には、鉄道の耐震基準³⁾を準用しせん断波速度 V_s については、 V_s を 0.75 倍した値を、減衰定数 h については、既往の土の室内試験結果¹⁶⁾を参考に 10% 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。

また、検討に用いる入力地震波は、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) を用いた。図-3 に入力地震動の時刻歴波形とフーリエ振幅スペクトルを示す。

(3) 解析結果

図-4 に有効入力係数 η の算定結果を示す。全体的な傾向として、振動数が 0Hz に近い低振動数領域では有効入力係数 η が 1.0 (入力損失効果なし) であることが分か

図-1 等価梁を求めるための仮定

図-2 杭基礎パラメータの概要

図-3 入力波の時刻歴波形およびフーリエ振幅スペクトル

る。ある振動数から有効入力係数 η が減少を始め (入力損失効果が現れ始め)、基礎・地盤の諸元によっては、振動数が 5Hz 程度で、有効入力係数 η が 0.5 程度まで減少する場合もある。以下に、ケースごとの比較により、入力損失の特徴を分析する。なお、図-4 に示すとおり、有効入力係数 η は振動数の依存が大きく、入力損失の違いが分かりづらいため、ここでは、7 章で後述するように応答スペクトルの低減率の観点から $\int \eta^2(\omega) d\omega$ で入力損失効果を定量的に評価した結果を表-2に示す。なお、表-2の値は鉄道の耐震設計で取扱う構造物の振動数帯域である 0~10Hz の範囲で積分を行った結果に対して、Case1 の $V_s=100$ m/s のケースを基準とした場合の各ケースの倍率を示している。よって、表中の値が小さいほど入力損失効果が大きくなる。

a) 地盤剛性の影響の比較

Case1~Case6 (図-4 (a)~(f)) および表-2 の各ケースにおいて、地盤剛性ごとのプロットを比較することで、地盤剛性の影響について分析する。各図表のいずれの結果を見ても、地盤の剛性が小さい (V_s が小さい) ほど入力損失効果が大きいことが分かる。

b) 杭径の影響の比較

Case1 ($D=1.0$ m : 図-4 (a)) , Case2 ($D=1.5$ m : 図-4 (b))

表-1 解析パラメータ

	杭諸元					地盤諸元			
	杭径 D (m)	杭間隔 s (m)	杭本数	杭長 l (m)	弾性係数 E_p (kN/m ²)	初期せん断波速度 V_{s0} (m/s)	等価せん断波速度 V_s (m/s)	ポアソン比 ν_s	層厚 H (m)
Case1	1.0	3.0	2×2	15	2.5×10^7	270 200 130	200 150 100	0.45	15
Case2	1.5	4.5	2×2	15	2.5×10^7			0.45	15
Case3	1.0	3.0	2×2	10	2.5×10^7			0.45	10
Case4	1.0	3.0	2×2	30	2.5×10^7			0.45	30
Case5	1.0	3.0	3×3	15	2.5×10^7			0.45	15
Case6	1.0	3.0	4×4	15	2.5×10^7			0.45	15

図-4 薄層要素法による有効入力係数 η (入力損失効果) の評価

表-2 各ケースの入力損失効果の比較

	Case1	Case2	Case3	Case4	Case5	Case6
$V_s=200$ (m/s)	1.74	1.62	1.75	1.76	1.74	1.76
$V_s=150$ (m/s)	1.61	1.29	1.55	1.60	1.54	1.55
$V_s=100$ (m/s)	1.00	0.73	0.93	1.05	0.90	0.86

および表-2を比較することで、杭径の影響について分析する。同図表より杭径が大きいCase2において、Case1より入力損失効果が大きいことが分かる。

c) 杭長の影響の比較

Case3 ($L=10$ m: 図-4 (c)), Case1 ($L=15$ m: 図-4 (a)), Case4 ($L=30$ m: 図-4 (d)) および表-2を比較することで、杭長の影響について分析する。杭長の変化に伴う感度は小さいものの、 $V_s=100$ m/s の場合には杭長が短いほど入力損失効果が大きくなる傾向がある。

d) 杭本数の影響の比較

Case1 (4本杭: 図-4 (a)), Case5 (9本杭: 図-4 (e)), Case6 (16本杭: 図-4 (f)) および表-2を比較することで、杭本数の影響について分析する。同図表より4本杭と9本杭を比べると、9本杭の方が入力損失効果が大きい。

杭径に比べると杭本数による感度は小さい。なお、16本杭は9本杭の場合と同程度である。

e) 解析結果の考察

入力損失は、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、これを平均化させようと働くことにより、入力損失効果の特性が生じる。つまり、1) 地盤が軟らかいほど 2) 杭径が大きいほど 3) 杭長が短いほど 4) 杭本数が多いほど地盤に対する杭基礎の相対的な剛性は大きくなり、杭基礎の存在が地盤の挙動を拘束する効果が大きく発揮され入力損失効果が大きくなったと解釈できる。

なお、これらの特性については既往の研究成果¹⁷⁾などと整合したものとなっていた。

図5 杭基礎パラメータの概要

4. 質点系モデルの解析精度の検証

本章では、鉄道構造物や道路橋など、耐震設計実務において、最も適用実績が多い質点系モデルについて、入力損失効果の観点からその適用性を検討する。

そこで、3章の検討で用いた薄層要素法による解析結果と、質点系モデルによる解析結果を比較し、質点系モデルによる入力損失の評価についてその適用性を検証する。

(1) 解析モデルおよび条件

本検討では、3章の検討における Case1 を比較対象とした。質点系モデルによりモデル化する杭基礎は、図-5に示す杭先端が支持され、杭頭部がフーチングに剛結された4本（2×2）の場所打ち杭を有する構造物とした。質点系モデルにおいては、構造物系と自由地盤系をモデル化し、それらを相互作用ばね（水平ばね、周面摩擦ばね、杭先端鉛直ばね）で連結することで、地盤と構造物の動的相互作用を表現している。

自由地盤は、構造物の応答の影響を受けないように十分に広い領域を対象にモデル化した。事前の検討の結果、フーチング面積の100倍以上の領域をモデル化するのが妥当であることを確認した。

一方、構造物系は、動的相互作用のうち幾何学的相互作用の影響のみを抽出するために、杭基礎フーチングのみをモデル化した。杭およびフーチングは線形の梁要素でモデル化し、その質量については無視している。

相互作用ばねのうち水平地盤反力係数 k_h は、弾性床上の梁の理論に基づき Vesic¹⁸⁾が提案した式(1)を適用し評価している。

$$k_h = 0.65 \frac{E_s}{(1-\nu_s^2)B} \sqrt[12]{\frac{E_p \cdot B^4}{E_p \cdot I_p}} \quad (1)$$

ここに、 B は杭径、 E_p は杭のヤング率、 I_p は杭の断面二次モーメント、 E_s は地盤のヤング率、 ν_s は地盤のポアソン比である。また、水平地盤反力係数 k_h には鉄道の設計基準¹⁹⁾に示される群杭効果を考慮した。その他の

図6 有効入力係数 η の比較

周面摩擦の鉛直地盤反力係数、および杭先端の鉛直地盤反力係数についても、同設計基準に基づき設定した。

解析は、ホワイトノイズを自由地盤の底面から入力した動的線形解析である。

(2) 解析結果の比較

図-6に質点系モデルおよび薄層要素法により求めた有効入力係数 η を示す。ここで、同図のうち質点系モデルから算定した有効入力係数 η は、自由地盤地表面に対する杭頭部の絶対加速度のフーリエ振幅スペクトル比としている。図より $V_s=100$ m/sの場合では両者とも3Hz程度から有効入力係数 η が減少をはじめ、10Hz程度まで単調に減少している。また、 $V_s=100$ m/sでは5Hz、 $V_s=150$ m/sでは8Hzより高振動領域において両者で若干の乖離がみられるが、質点系モデルと薄層要素法で算出した有効入力係数 η は全体的には調和的である。

なお、質点系モデルでは、インピーダンスの周波数依存性を考慮しておらず、また群杭効果の影響も簡略化しているなど、薄層要素法とは本質的に異なるモデルであり、このことが上記の乖離が生じた原因と考えられる。しかし、本検討結果からは、質点系モデルを用いても入力損失効果を概ね適切に評価できることを確認した。この点は、既往の研究では言及されてこなかった点であろう。なお、ここでは1ケースの結果についてのみ示しているが、他の検討ケースでも検討した結果、同様の傾向が得られている。

5. 入力損失効果を耐震設計実務に考慮するうえでの課題

4章では、入力損失効果を、設計実務でも実績の多い多質点系モデルを用いた動的解析でも自動的に評価可能であることを確認した。ただし、1章で述べたように、設計実務において動的解析が用いられるのは、長大橋梁であったり、形状が特殊なものを対象にした場合に限られる。一般的に鉄道で採用されるラーメン高架橋や橋脚

は単純な形状が多く、重量が上部工に集中していることから、1次の振動モードを考慮した1自由度系の振動で表現できることが確認されている²⁰⁾。そのため、地震応答は所要降伏震度スペクトルにより算定し、その結果をプッシュ・オーバー解析にフィードバックすることで各部材の損傷レベルや基礎の安定レベルを照査している。

このような静的解析を基本とした設計体系の中で、本論文で対象とした入力損失効果を導入するためには、何らかの工夫が必要になっていく。具体的には、以下の2点が必要となる。

- 1) 有効入力係数 η を薄層要素法や多質点系の動的解析を行わずに、静的解析の枠組みの中で算定可能とすること
- 2) 上記で算定された有効入力係数 η を所要降伏震度スペクトルに反映させること

そこで、1)については6章で、2)については7章でそれぞれ提案した手法を述べることにする。

6. 有効入力係数の簡易評価手法

(1) 評価手法の概要

地震時の地盤・基礎系の動的相互作用である幾何学的相互作用は、自然地盤の振動による地盤と杭基礎の相互作用と解釈することができる。そこで、自然地盤の各モードの固有値から得られる固有モードを地盤変位と解釈し、基礎構造物に作用させることで得られる基礎の変位応答と地盤変位の比から入力損失を評価できると考えた。その際には、“応答変位法”を適用することとする。応答変位法は、地盤変位を基礎構造物に静的に作用させて基礎の変位と断面力を求める静的解析法の1つであり、鉄道構造物の耐震設計においては、杭基礎やケーソン基礎などの深い基礎の設計では、基本的な手法として従来から採用されている。また、本手法は鉄道に限らず、土木・建築の設計実務において親しみのある手法である。

提案手法の詳細な手順は下記のとおりであり、その概要を図-7に示す。

Step1: 自由地盤をモデル化し、固有値解析を実施することで、各モード次数における固有振動数および各固有モード形状を算出する。

Step2: 応答変位法において、固有値解析から算出した各固有モード形状を地盤変位として構造物に作用させることで、基礎構造物の変位応答を算出する。この時、各固有モードの振幅の最大を1.0として作用させる。

Step3: 応答変位法から算出した基礎構造物の杭頭位置での変位を作用させた自由地盤の変位で除すことで、各モード次数の固有振動数に対する有効入力係数 η を算出する。

Step4: 各固有振動数で得られた有効入力係数 η を直線補間し、振動数領域における有効入力係数 η を算定する。

なお、Step1で行う固有値解析では3次モードまで算定すればよい。これは、鉄道の耐震設計で取扱う構造物の振動数帯域は10Hzまでを対象としており、杭が用いられる一般的な地盤条件であれば、3次モードまで有効入力係数 η を算定することで概ね振動数帯域を網羅できると思われる。また、これにより、網羅できない場合は、3次モードで得られた有効入力係数 η を一定とし10Hzまで補完すればよい。これは、図-4から分かるように有効入力係数 η は、その値が低減しきった以降の高振動領域では一定の低い値を上下する傾向があり、平均的にみると値を一定とみなすことができるためである。

(2) 評価手法の有効性の検証

図-8に示す群杭形式の基礎構造物を対象に、提案法の有効性を検証する。対象構造物は、9本(3×3)の完全支持杭であり、杭頭はフーチングに剛結されている条件とした。また、地盤条件は、鉄道の耐震設計における、G3地盤(普通地盤)相当のType A地盤(多層地盤)お

図-7 有効入力係数 η の評価手法の概要

図-8 対象構造物の概要

図-9 柱状図

図-10 自由地盤の変位分布と応答変位法により求めた基礎構造物の変位応答

図-11 有効入力係数 η の比較

よび G4 地盤（普通～軟弱地盤）相当の Type B 地盤（一層地盤）の 2 種類の地盤を想定した。図-9 に想定した地盤の土質柱状図および両地盤の初期せん断波速度 V_{s0} 値の深度方向分布を示す。

なお、比較対象である動的解析では、4 章で行った検討と同様に質点系モデルにより自由地盤と構造物のモデル化を行った。また、相互作用ばねも同様に式(1)により算定している。

Type A, Type B 地盤において上記 Step1, Step2 により算出した 1～3 次モードの自由地盤と構造物（杭頭）の変位を図-10 に、提案手法および動的解析から算出した有効入力係数 η を図-11 に示す。図-10 より入力損失は、自由地盤の変位に対して構造物の変位が追従しなくなることで生じており、地表面付近の地盤が軟らかい Type A 地盤ではこの現象が顕著に表れている。これは、3 章で述べたように地盤の剛性に対する杭の剛性が相対的に大きくなったことに起因しており、この結果、図-11 に示す有効入力係数 η は、Type B に比べ Type A の方が低振動領域で低減し、より大きな入力損失効果が生じている。

また、変形の波長が短くなる高次モードほど、地盤の変位に対して杭基礎が変形しづらくすることで地盤の変位に比べ杭基礎の変位が小さくなり、その結果、有効入力係数 η が低減している。

次に、図-11 から提案手法を用いて算出した有効入力係数 η は動的解析の結果を概ね良好に近似しており、本評価手法を用いて精度良く入力損失を評価できることが確認できる。

7. 入力損失による簡易な所要降伏震度スペクトルの低減

6 章で提案した手法を用いて算定した有効入力係数 η （入力損失）を使用して所要降伏震度スペクトルを補正することを考える。一般的には、地表面地震動のフーリエスペクトルに有効入力係数 η を乗じ、これを逆フーリエ変換することで有効入力動を算定し、1 自由度系の非線形動的解析を実施することで所要降伏震度スペクトル

を算出すれば良い。しかし、この手法は、周波数領域において入力損失を考慮し、時間領域で有効入力動に応じた応答スペクトルを算定するため、一般的な設計実務においては馴染まない。

そこで、本章では、入力損失を考慮した構造物の応答評価をランダム振動論を用いることで、直接的に所要降伏震度スペクトルを低減する手法を提案する。また、本手法と逐次積分法を用いて得られた結果を比較することで、提案手法の適用性を検証する。

(1) ランダム振動論に基づくスペクトル比の算定

ランダム振動論では、パワースペクトルや実効値(RMS)を用いて振動を取扱うと共に、確率論的応答評価に基づきピークファクター p を求めることで構造物の最大応答を評価する²⁾。実効値とは、平均的な大きさを表す指標であり1自由度系の絶対加速度の伝達関数の二乗と地震動の加速度パワースペクトル密度の積の平方根である式(2)で表わされる。

$$\sigma_a(\omega_0, h) = \sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} |H_a(\omega_0, h, \omega)|^2 \cdot G_a(\omega) d\omega} \quad (2)$$

ここに、 $G_a(\omega) d\omega$ は、地震動の加速度パワースペクトル密度、 $H_a(\omega_0, h, \omega)$ は1自由度系の絶対加速度の伝達関数であり、

$$|H_a(\omega_0, h, \omega)|^2 = \frac{1 + 4h^2(\omega/\omega_0)^2}{\{1 - (\omega/\omega_0)^2\}^2 + 4h^2(\omega/\omega_0)^2} \quad (3)$$

である。ここで、式(3)中の ω_0 は構造物の固有円振動数、 h は構造物の減衰定数を示す。1自由度系の構造物の加速度応答の実効値から最大加速度応答を求めるためには、ピークファクター p が必要となる。Rosenblueth and Bustamante²⁾によれば、1自由度系のパワースペクトル密度 $G_a(\omega)$ のホワイトノイズが地震動として作用した場合、最大応答値 $S_a(\omega_0, h)$ は次式で与えられる。

$$S_a(\omega_0, h) = \omega_0 \sqrt{\frac{\pi G_a}{2h\omega_0}} \cdot \sqrt{1 - \exp(-2h\omega_0 t_d)} \cdot \sqrt{2 \cdot \sqrt{0.424 + \ln(2h\omega_0 t_d + 1.78)}} \quad (4)$$

ここに、 t_d は地震動継続時間(主要動部)である。一方、ホワイトノイズの地震動を考えた場合、式(2)の積分を実行すると、式(5)が得られる。

$$\sigma_a(\omega_0, h) = \sqrt{\frac{\omega_0 \pi G_a}{2h}} \quad (5)$$

また、式(4)と(5)から $G_a(\omega)$ を消去すると、式(6)となる。

$$S_a(\omega_0, h) = \sigma_a(\omega_0, h) \cdot \sqrt{1 - \exp(-2h\omega_0 t_d)} \cdot \sqrt{2 \cdot \sqrt{0.424 + \ln(2h\omega_0 t_d + 1.78)}} \quad (6)$$

式(6)を用いる場合、 $\sigma_a(\omega_0, h)$ は、式(5)ではなく式(2)から計算されることで、地震動をホワイトノイズと仮定する必要がなくなる。この場合、ピークファクター p は、式(7)を採用していることになる。

$$p = \sqrt{2 \cdot \sqrt{0.424 + \ln(2h\omega_0 t_d + 1.78)}} \quad (7)$$

次に、オリジナルの応答スペクトルを $S_a^{org}(\omega_0, h)$ 、入力損失効果を考慮した応答スペクトルを $S_a^{mod}(\omega_0, h)$ とすると式(8)、(9)となる。

$$S_a^{org}(\omega_0, h) = \sigma_a^{org}(\omega_0, h) \cdot \sqrt{1 - \exp(-2h\omega_0 t_d)} \cdot \sqrt{2 \cdot \sqrt{0.424 + \ln(2h\omega_0 t_d + 1.78)}} \quad (8)$$

$$S_a^{mod}(\omega_0, h) = \sigma_a^{mod}(\omega_0, h) \cdot \sqrt{1 - \exp(-2h\omega_0 t_d)} \cdot \sqrt{2 \cdot \sqrt{0.424 + \ln(2h\omega_0 t_d + 1.78)}} \quad (9)$$

これにより、式(8)と式(9)から構造物の応答スペクトル比は式(10)となり、式(2)を用いると式(11)で表わすことができる。

$$R = \frac{S_a^{mod}(\omega_0, h)}{S_a^{org}(\omega_0, h)} = \frac{\sigma_a^{mod}(\omega_0, h)}{\sigma_a^{org}(\omega_0, h)} \quad (10)$$

$$R = \sqrt{\frac{\int_{-\infty}^{\infty} |H_a(\omega_0, h, \omega)|^2 \cdot \{\eta(\omega)\}^2 \cdot G_a(\omega) d\omega}{\int_{-\infty}^{\infty} |H_a(\omega_0, h, \omega)|^2 \cdot G_a(\omega) d\omega}} \quad (11)$$

ここで、 $\eta(\omega)$ は有効入力係数である。

さて、式(11)は線形応答スペクトルの比になるが、現在の鉄道の耐震設計ではL2地震動に対して構造物の性能評価を行う場合、非線形領域に立ち入った照査を行うことが前提となっている。そのため、所要降伏震度スペクトルを低減するためには、式(11)において構造物の非線形性を考慮する必要がある。そこで、ある塑性率 μ に対する所要降伏震度スペクトルを最大点剛性により算定される等価線形化法²⁾を用いて、式(11)における構造物の固有円振動数 ω_0 および減衰定数 h の代わりに式(12)、式(13)で表わされる構造物の等価円振動数 ω_{eq} および等価減衰定数 h_{eq} を用いる。

$$\omega_{eq} = \frac{\omega_0}{\sqrt{\mu}} \quad (12)$$

$$h_{eq} = h_0 + \frac{1}{\pi} \left[1 - \frac{1}{\sqrt{\mu}} \right] \quad (13)$$

ここで、 h_0 は初期減衰であり、ここでは5%としている。以上より、構造物の非線形性を考慮した場合、式(11)は式(14)となる。

$$R = \sqrt{\frac{\int_{-\infty}^{\infty} |H_a(\omega_{eq}, h_{eq}, \omega)|^2 \cdot \{\eta(\omega)\}^2 \cdot G_a(\omega) d\omega}{\int_{-\infty}^{\infty} |H_a(\omega_{eq}, h_{eq}, \omega)|^2 \cdot G_a(\omega) d\omega}} \quad (14)$$

本提案手法では、式(14)を用いることで入力損失を考慮した場合の所要降伏震度スペクトルの低減を評価する。

図-12 地震動の時刻歴波形およびフーリエ振幅スペクトル

(2) 提案手法の適用性の検討

提案手法により求めた所要降伏震度スペクトルと、有効入力動から逐次積分法により求めた所要降伏震度スペクトルを比較する。対象とした構造物は、6章の検討で用いた群杭基礎形式の構造物とした。また、地震動は、図-12に示す鉄道の耐震基準に示される設計地震動および短周期成分が卓越する2011年の東北地方太平洋沖地震における築館における記録を用いた。比較対象である逐次積分法による所要降伏震度スペクトルの算定条件は、現行の耐震基準³⁾と同条件とし、1自由度系の非線形特性はCloughモデルを使用し、減衰定数 h を $0.04/T$ で与え、上限を20%、下限を10%と設定した。一方、提案手法における初期減衰定数 h_0 は5%とした。考慮する入力損失は、図-11のうち応答変位法を用いて算出したType A地盤の有効入力係数 η を用いた。

上記の条件により算出した応答塑性率 μ が2, 4となる場合の所要降伏震度スペクトルを図-13に示す。同図には、入力損失を考慮しない場合の所要降伏震度スペクトルを併せて示す。図-13(a)に示す設計地震動を用いた場合は、提案手法は逐次積分法による結果の特徴を良好に捉えている。また、図-13(b)に示す東北地方太平洋沖地震を用いた場合も、提案手法は逐次積分法の結果と近似しており、短周期の範囲でも概ね一致している。以上より、提案手法である式(14)の妥当性が確認できる。

また、図-13より入力損失による所要降伏震度スペクトルの低減は、短周期において顕著に表れている。入力地震動による違いを見てみると、設計地震動のように地震波の短周期成分が少ない場合に比べ、東北地方太平洋沖地震のように短周期が非常に卓越した地震動では、入力損失効果により短周期成分がカットされることで、波形全体に与える影響が大きくなる。その結果、短周期の構造物の応答を低減させていることが分かる。

図-13 入力損失を考慮した場合の所要降伏震度スペクトル

8. おわりに

本研究は、鉄道構造物において多用されている杭基礎構造物による入力損失を静的解析法に導入可能な手法を検討した。

まず、地盤条件、杭基礎の諸元を変化させた感度解析を実施し、入力損失の特性について把握した。また、質点系モデルによる入力損失の評価について解析の検証を行った。その結果、以下の結論を得た。

- 1) 入力損失効果は、地盤が軟らかいほど、杭径が大きいほど、杭長が短いほど、杭本数が多いほど地盤に対する杭基礎の相対的な剛性は大きくなり、その結果、入力損失が大きくなる。
 - 2) 質点系モデルで算出した有効入力係数 η は薄層要素法で算出した有効入力係数 η と調和的で、質点系モデルを用いて入力損失を適切に評価できる。
- 次に、耐震設計実務において入力損失効果を合理的に取り込むための手法を検討した。その結果、以下の結論を得た。
- 1) 有効入力係数 η は、地盤の固有モードを地盤変位と解釈して、それによる杭頭変位を応答変位法により求め、地盤変位と杭頭変位の比を算出することで良好に表現出来ることが分かった。
 - 2) ランダム振動論を採用することで、上記で得られた有効損失係数 η を設計用の応答スペクトルに考慮出来ることが分かった。
 - 3) 上記により、現在の耐震設計の体系の中で、入力損失効果を見込めるようになった。また、入力損失の効果により、短周期において所要降伏震度スペクトルが低減される。特に短周期成分が

多く含まれる地震動に対しては、低減が大きくその効果が顕著となることが明らかとなった。

謝辞：本研究を進めるにあたり、埼玉大学の齊藤正人教授には、入力損失に関して大変有益なご助言を頂いた。また、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。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 齊藤正人, 西村昭彦, 渡邊啓行: 曲げ柔性の影響を考慮した大型基礎の入力損失効果に関する理論的評価, 土木学会論文集, No. 731, pp. 317-330, 2003.
- 2) 田蔵隆, 若原敏裕, 清水勝美, 松崎雅彦: 群杭基礎の有効入力動と動的相互作用を考慮した加速度応答スペクトルに関する研究, 清水建設研究報告, 第 46 号, pp. 25-34, 1987.
- 3) 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.
- 4) 道路協会: 道路橋示方書・同解説 耐震設計編, 1996.
- 5) 齊藤正人, 西村昭彦: 基礎の入力損失効果を考慮した所要降伏震度スペクトルに関する研究, 第 25 回地震工学研究発表会講演論文集, pp. 541-544, 1999.
- 6) 防災科学技術研究所 強震観測網 (K-NET, KiKnet), <http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/>
- 7) 王海波, 西村昭彦, 長縄卓夫: 基盤入力地震動の考え方と応答スペクトルの設定, 鉄道総研報告, Vol. 13, No. 2, 1999.
- 8) ISO 23469: Bases for design of structures—Seismic actions for designing geotechnical works, 2005.
- 9) Veletsos, A. S., Newmark, N. M. and Chelapati, C. V.: Deformation spectra for elastic and elastoplastic systems subjected to ground shock and earthquake motions, *Proceedings of the Third World Conference on Earthquake Engineering*, Vol. 2, pp. 663-682, 1965.
- 10) 田蔵隆, 若原敏裕, 清水勝美, 松崎雅彦, 岡内功: 杭基礎の有効入力動に関する研究, 地震工学研究発表会, Vol. 19, pp. 269-272, 1987.
- 11) 長谷川正幸, 中井正一: 杭の地震時応力とその評価法に関する研究, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 432 号, pp. 105-118, 1992.
- 12) Takemiya, H.: Ring-Pile analysis for a grouped pile foundation subjected to base motion, *Structural Eng./ Earthquake Eng.*, Vol. 3, No. 1 (*Proc. of JSCE*, No. 368/I-5), pp. 195-202, 1986.
- 13) Konagai, K.: An Upright Single Beam Equivalent to Grouped Piles, 生産研究, 50 巻 9 号, pp. 13-16, 1998.
- 14) Konagai, K., Yin, Y. and Murono, Y.: Single beam analogy for describing soil-pile group interaction, *Soil Dynamics and earthquake Engineering*, pp. 213-221, 2003.
- 15) Tajimi, H.: A Contribution to Theoretical Prediction of Dynamic Stiffness Surface foundation, *Proc. of 7th WCEE*, Vol. 5, pp. 105-112, 1980.
- 16) Kokusho, T.: Cyclic triaxial test of dynamic soil properties for wide strain range, *Soils and Foundations*, Vol. 20, No. 2, pp. 45-60, 1980.
- 17) 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.
- 18) Vesic, A. B.: Bending of beams resting on isotropic elastic solid, *Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE*, EM2, pp. 35-53, 1961.
- 19) 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, 丸善出版, 2012.
- 20) 西村昭彦, 室野剛隆, 齊藤正人: 所要降伏震度スペクトルの作成と耐震設計への適用, 第 3 回地震時保有耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, pp. 43-48, 1999.
- 21) Kiureghian, A. D.: A response spectrum method for random vibration analysis of MDF systems, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 9, pp. 419-435, 1981.
- 22) Rosenblueth, E. and Bustamante, J. I.: Distribution of structural response to earthquakes, *Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE*, EM3, pp. 75-106, 1962.
- 23) 柴田明徳: 最新 耐震構造解析, pp. 127-129, 森北出版, 1981.

(2016. 10. 25 受付)

PRACTICAL EVALUATION METHOD OF INPUT LOSS EFFECT CAUSED BY PILE FOUNDATION

Yudai HOCHI and Yoshitaka MURONO

More reasonable seismic design can be achieved by considering the input loss effect of the soil-foundation interaction. However, there is no practical evaluation method of the input loss in the seismic design by means of the static analysis method for the foundation widely used in the railway field. Therefore, we examined a practical evaluation method of the input loss effect for the static analysis method. First, we conducted sensitivity analysis by varying the conditions of both the grounds and the piles, and the input loss effects caused by the pile foundations were investigated. Then, we proposed a practical method for calculating effective input coefficients by means of a seismic deformation method and that for calculating response spectra based on the random vibration theory. Furthermore, the applicability of these methods was verified through comparison between the dynamic analysis results and the evaluated results.