

耐震設計の静的解析における入力損失効果の評価手法

竇地 雄大* 土井 達也** 室野 剛隆***

Evaluation Method of Input Loss Effect in Seismic Design by means of Static Analysis Method

Yudai HOCHI Tatsuya DOI 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.

キーワード：入力損失，有効入力動，杭基礎，応答変位法，ランダム振動論，周面支持杭

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⁾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²⁾では入力損失を設計に考慮してよいことが示されている。

一方、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、動的解析に関する多くの知識や経験が設計技術者に要求される。そのため、長大橋りょう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。

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。鉄道においては、所要降伏震度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。この解析法では、

あらかじ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、一般的な鉄道構造物に多くみられる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がなく、耐震設計実務において入力損失の影響が考慮されていないのが実情である。そのため、鉄道構造物に多用されている杭基礎を対象とした静的解析法に、入力損失を導入するための実務的手法の確立が望まれる。

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。検討では初めに、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、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て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. 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、既往の研究³⁾などで議論がなされているが、3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。

2.1 解析手法の概要

杭基礎構造物のうち、群杭基礎の解析が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など

* 鉄道地震工学研究センター 地震応答制御研究室
(現 東海旅客鉄道株式会社)
** 鉄道地震工学研究センター 地震応答制御研究室
*** 鉄道地震工学研究センター

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^{4) 5)}など。その多くは、杭本数や杭間隔について適用可能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^{4) 5)}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り、詳細は文献5)を参考にされたい。ここでは、本検討における等価梁の計算で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
- ・杭頭はフーチングに固定され、回転が拘束されている
- ・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、地震波の伝播を表現するために、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を用いることとした。

本解析モデルにおいて、基礎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、慣性による相互作用の影響を取り除いている。

2.2 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、現行の耐震基準²⁾を参考にせん断波速度 V_s については、 V_s を0.75倍した値を、減衰定数については、既往の土の室内試験結果を参考に10%を解析に用いた。その他の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。

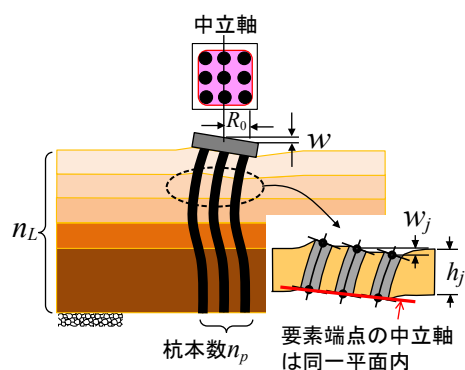


図1 等価梁を求めるための仮定

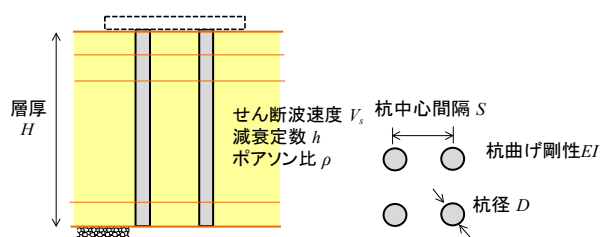


図2 杭基礎パラメータの概要

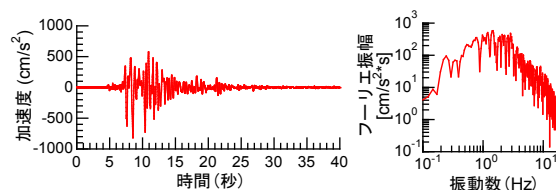


図3 時刻歴波形とフーリエ振幅スペクトル

2.3 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であることが分かる。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、入力損失の特徴を詳細に分析する。

2.3.1 地盤剛性の影響の比較

Case1～Case6(図4(a)～(f))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。

2.3.2 杭径の影響の比較

Case1($D=1.0\text{m}$:図4(a))とCase2($D=1.5\text{m}$:図4(b))を比較することで、杭径の影響について分析する。同図より杭径が大きいCase2において、Case1より入力損失効果が大きいことが分かる。

表1 解析パラメータ

	杭諸元					地盤諸元			
	杭径	杭間隔	杭本数	杭長	弾性係数	初期せん断波速度	等価せん断波速度	ポアソン比	層厚
	D (m)	s (m)		L (m)	E_p (kN/m ²)	V_{s0} (m/s)	V_s (m/s)	ν_s	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

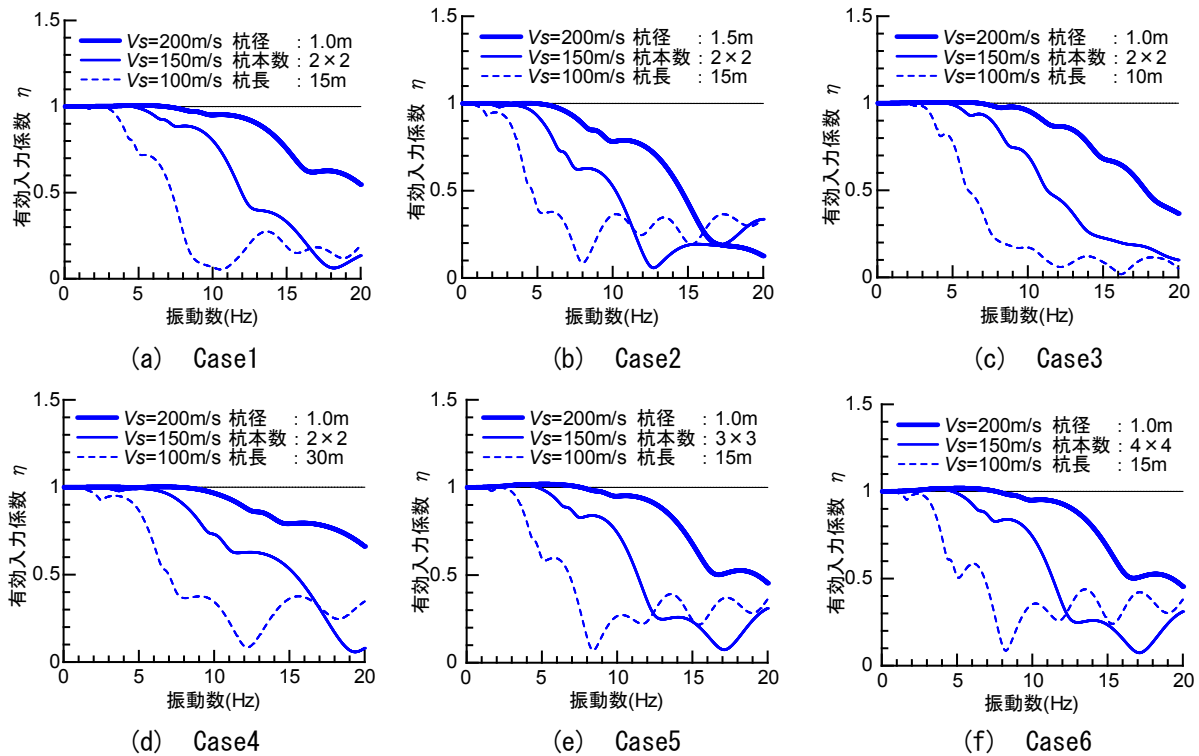


図4 薄層要素法による有効入力係数 η (入力損失効果) の評価

2.3.3 杭長の影響の比較

Case3 ($L=10m$: 図4 (c)), Case1 ($L=15m$: 図4 (a)) および Case4 ($L=30m$: 図4 (d)) 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、杭長が短いほど入力損失効果が大きくなる傾向がある。

2.3.4 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)) の結果を比較することで、杭本数の影響について分析する。同図より4本杭と9本杭を比べると、9本杭の方が入力損失効果は大きい、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。

2.3.5 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

が生じる。上述の解析結果から、①地盤が軟らかいほど②杭径が大きいか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。

3. 入力損失効果を耐震設計実務に考慮するうえでの課題

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、長大橋梁や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。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などを照査している。

特集：地震防災・耐震技術

このような静的解析を基本とした設計体系の中に、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となる。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4章で、②については5章でそれぞれ提案する手法を述べることにする。

4. 有効入力係数の簡易評価手法

4.1 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や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よく用いられる手法である。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5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

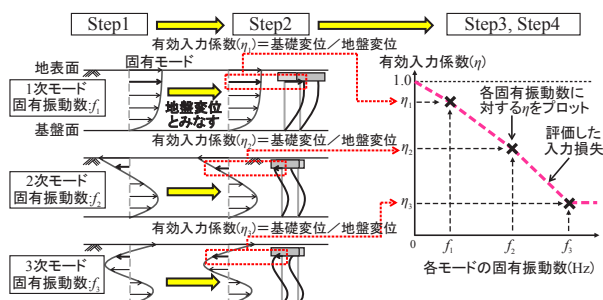


図5 有効入力係数 η の評価手法の概要

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、耐震設計における構造物の振動数帯域である3次モードまでを考慮すればよい。

4.2 評価手法の有効性の検証

図6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、4本(2×2)の杭長が異なる完全支持杭と周面支持杭の3種類を対象とした。また、杭頭はフーチングに剛結されている条件とし、地盤条件は、等価せん断波速度 V_s を100m/sとする一層地盤を想定した。

なお、比較対象である動的解析は、質点系モデルにより自由地盤と構造物をモデル化した。また、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、構造物の質量については無視している。上記により行う解析条件を表2に示す。

Case1, Case3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7に示す。同図より入力損失は、自由地盤の変位に対して構造物の変位が追随しなくなることで生じていることが分かる。また、その傾向は高次モードほど顕著に表れている。これは、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な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、振動数が高い高次モードほど入力損失効果が大きくなるためである。次に、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8に示す。同図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

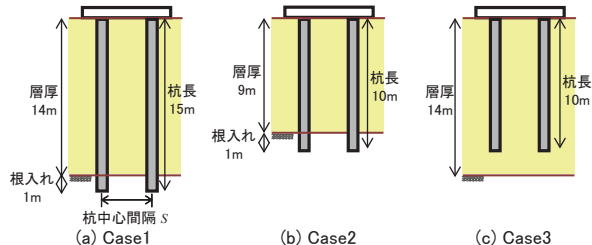


図6 対象とする地盤・構造物諸元の概要

表2 解析条件

Case	杭長 (m)	層厚 (m)	杭間隔 (m)	杭径 (m)	杭本数	支持形式
Case1	15.0	14.0	3.0	1.0	2 × 2	完全支持杭
Case2	10.0	9.0	3.0			周面支持杭
Case3	10.0	14.0	3.0			周面支持杭

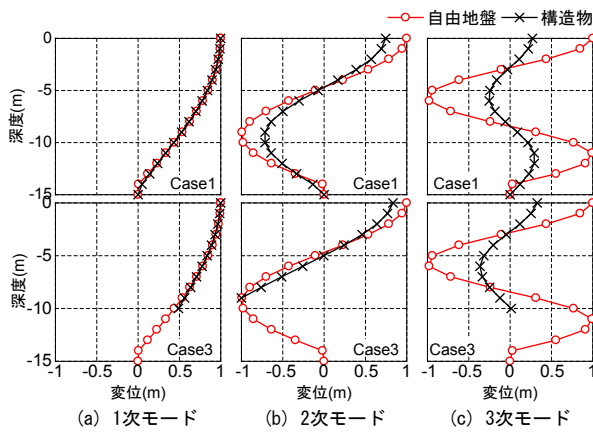


図7 自由地盤と基礎構造物の変位応答

く入力損失を評価できることが確認できる。また、同図右下の各ケースの比較のうち Case1 と Case3 に着目すると、Case3（周面支持杭）に比べ Case1（完全支持杭）の方が全体的な傾向として有効入力係数 η の低減が大きく、入力損失効果大きい。これは、図7から分かるように Case3 では深度 10m 付近の杭先端の支持力（固定度）が小さく杭基礎全体のロッキング挙動が大きくなることで、地盤の変位に対して杭基礎が追従し易くなり、入力損失効果が完全支持杭に比べ小さくなったためと考えられる。

5. 入力損失による簡易な所要降伏震度スペクトルの低減

4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、フーリエ変換・逆変換というプロセスが必要であること、ならびに設計所要降伏震度スペクトルを再定義する必要があり、設計実務においては使い易いとは言えない。

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。

5.1 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ふと共に、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

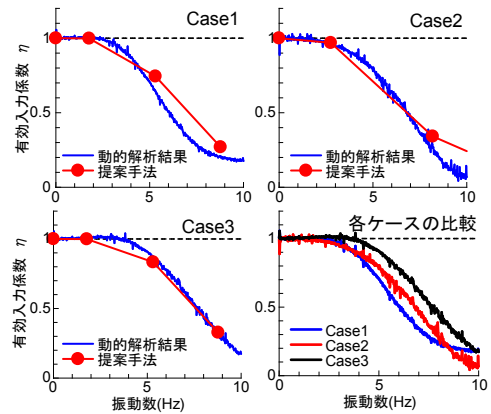


図8 有効入力係数 η の比較

最大応答を評価する。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 (1) で表わされる。

$$\sigma_a(\omega_0, h) = \sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} |H_a(\omega_0, h, \omega)|^2 \cdot G_a(\omega) d\omega} \quad (1)$$

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、 ω_0 は構造物の固有円振動数、 h は構造物の減衰定数である。ここで、1 自由度系の構造物の最大加速度応答 $S_a(\omega_0, h)$ を求めるためには、式 (1) の実効値にピークファクター p を乗ずればよい。このとき、入力損失を考慮しない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 $S_a^{mod}(\omega_0, h)$ とし、両者の構造物の応答スペクトル比を R とすると、ピークファクター p は消去され、式 (1) より式 (2) で表わすことができる。

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

ここで、 $\eta(\omega)$ は有効入力係数である。

さて、式 (2) は線形応答スペクトルの比になるが、現在の耐震設計では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 (2) 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、等価線形化法を用いて、式 (2) 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 (3) 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。

$$\omega_{eq} = \frac{\omega_0}{\sqrt{\mu}}, \quad h_{eq} = h_0 + \frac{1}{\pi} \left[1 - \frac{1}{\sqrt{\mu}} \right] \quad (3)$$

特集：地震防災・耐震技術

ここで、 μ は応答塑性率、 h_0 は初期減衰でここでは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(2)は式(4)となる。

$$R = \sqrt{\frac{\int_{-\infty}^{\infty} |H_a(\omega_{eq}, h_{eq}, \omega)|^2 \cdot \{\eta(\omega)\}^2 \cdot G_a(\omega) d\omega}{\int_{-\infty}^{\infty} |H_a(\omega_{eq}, h_{eq}, \omega)|^2 \cdot G_a(\omega) d\omega}} \quad (4)$$

本提案手法では、式(4)により、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。

5.2 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、4章の検討で用いた群杭基礎形式の構造物である。また、地震動は、図9に示す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²⁾と同条件とした。一方、提案手法における初期減衰定数 h_0 を5%とした。考慮する入力損失は、図8のうち応答変位法を用いて算出したCase1の有効入力係数 η を用いた。

上記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10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。図に示すとおり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おり、提案手法である式(4)の妥当性が確認できる。また、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ことが分かる。

6. 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。その結果、以下の結論を得た。

- ・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、大きくなる。

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。

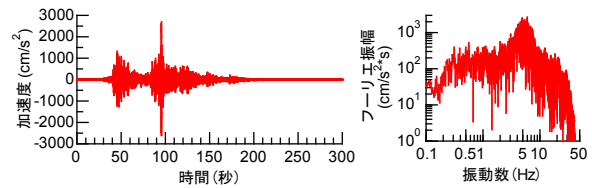


図9 地震動の時刻歴波形、フーリエスペクトル

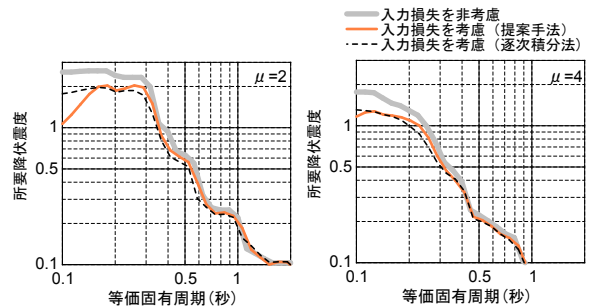


図10 η を考慮した所要降伏震度スペクトル

- ①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により有効入力係数 η を算出することで、入力損失効果を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ことが明らかとなった。
- ④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。

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, pp.317-330, 2003
- 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) 田蔵隆, 若原敏裕, 清水勝美, 松崎雅彦, 岡内功: 群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
- 4) Kazuo Konagai: An Upright Single Beam Equivalent to Grouped Piles, 生産研究 50巻9号, pp.13-16, 1998.
- 5) 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.