

杭基礎ラーメン高架橋の入力損失効果と その実務的評価法の提案

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 鉄道地震工学研究センター 地震応答制御
（〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38）

²正会員 工博 （公財）鉄道総合技術研究所 鉄道地震工学研究センター
（〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38）

1. はじめに

杭基礎に支持される構造物では、基礎が存在することによって、地震動による構造物周辺の地盤の動きが拘束され自由地盤に比べ構造物に入射される地震動が低減される入力損失が生じることが一般に知られている¹⁾など。入力損失に関して、これまで群杭基礎等の大型基礎を対象に実験的・解析的に様々な検討がされており^{2),3)}など、杭基礎による入力損失効果があることが分かっている。しかし、鉄道構造物で多用されている1柱1杭形式のラーメン高架橋では、杭間隔が大きく群杭効果が期待できないことから入力損失効果に関する研究事例は少ない。

一方で、耐震設計に入力損失を考慮するには、質点系モデルを使用した解析では、自由地盤と構造物を一体でモデル化した一体型モデルを用いて動的解析を行うことで自動的に考慮される。その他にも、既往の研究により地盤と構造物の地震応答を評価する手法が提案されている^{4),7)}など。ただし、これらの手法はモデル化や物性値の設定が複雑であり、煩雑な作業が必要となる。このため、鉄道の耐震設計⁸⁾では、設計実務の簡素化のため静的解析法が採用されることが多く、地震動に対する慣性力の影響を非線形応答スペクトル法により評価する。静的解析法は、簡易に構造物の地震応答を評価できる反面、入力損失を考慮した応答評価を行うためには、別途詳細な検討が必要となる。そのため、設計実務では検討の煩雑さと入力損失を考慮しない安全側の評価を優先し、入力損失効果を考慮することは少ない。しかし、耐震設計において入力損失効果を考慮することで合理的な設計が可能となることから、静的解析

法において入力損失効果を考慮した構造物の応答評価を簡易に行う手法が望まれる。

そこで、本研究では、初めに1柱1杭形式のラーメン高架橋の入力損失効果について解析的な検討を行った。検討は、質点系の2次元モデルを用いて動的解析を行うことで、ラーメン高架橋の入力損失効果を検討した。次に、静的解析法を使用した耐震設計に、入力損失効果を考慮するための簡易な手法として、有効入力係数の算定手法および構造物応答の評価手法を提案し、試計算を行うことでその適用性について検討を行った。

2. ラーメン高架橋の入力損失効果

本章では、ラーメン高架橋の入力損失効果を明らかにするために、質点系モデルを用いた動的解析を実施する。入力損失効果の評価は、自由地盤の地震応答に対する杭基礎の地震応答の比である有効入力係数 (η) を算定することで行う。なお、質点系モデルの解析精度の検証については、地盤を薄層要素法⁷⁾、杭基礎を等価梁法⁵⁾により表現した解析モデルとの比較を別途実施し、その精度を確認している。

(1) 解析モデル

自由地盤と構造物の地震応答を求めるために、図-1に示すように、部材を梁要素、自由地盤をばね要素でモデル化した質点系モデルを作成した。対象構造物である1柱1杭形式のラーメン高架橋のモデル化は、杭径1m、杭長21.0mのRC杭が地中梁に剛結されている条件とした。また、相互作用のうちKinematicな作用を抽出するために、杭基礎等の構造物は無質

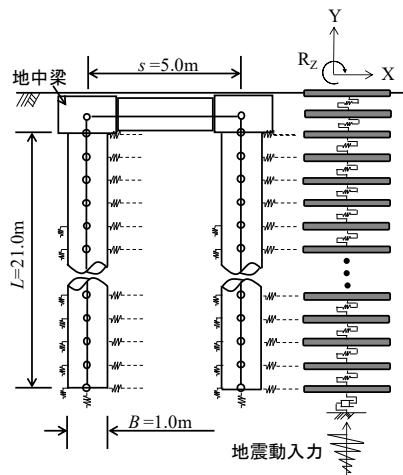


図-1 構造解析モデル

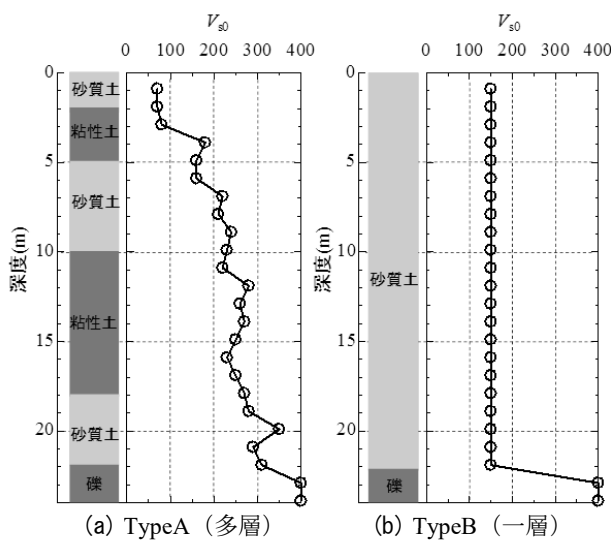


図-2 地盤条件

量とし、慣性力による相互作用の影響を除いた。次に、地盤条件の違いが入力損失効果に与える影響を検討するために、鉄道の耐震設計における、G3地盤（普通地盤）相当の多層地盤（TypeA）とG4地盤（普通～軟弱地盤）相当の一層地盤（TypeB）の2種類の地盤を設定した。また、地盤ばねのうち水平地盤反力係数の算定式は、鉄道構造物の設計⁹⁾で用いられる式(1)と弾性支承梁の理論に基づきVesicが提案¹⁰⁾した式(2)を用いた。図-2に設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_{so} 値の深度方向分布を示す。

$$k_h = 3.6\rho_{gk}E_d B^{3/4} \quad (1)$$

ここに、 E_d は地盤の変形係数、 ρ_{gk} は作用の継続時間に対する修正係数で本検討では ρ_{gk} を1.0とした。なお、 E_d については、鉄道構造物の設計標準では微小ひずみレベルではなく、ある程度ひずみが生じた状

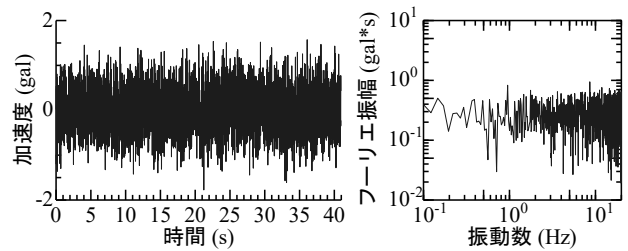


図-3 入力波の時刻歴波形とフーリエ振幅スペクトル

表-1 検討ケース

項目	case1-1	case2-1	case1-2	case2-2
地層構成	Type A	Type B	Type A	Type B
杭本数 (本)	2	2	2	2
杭径 B (m)	1.0	1.0	1.0	1.0
杭間隔 s (m)	5.0	3.0	5.0	3.0
杭長 L (m)	21.0	21.0	21.0	21.0
杭のヤング係数 E_p (kN/m ²)	2.50×10^7	2.50×10^7	2.50×10^7	2.50×10^7
杭の断面二次モーメント I_p (m ⁴)	0.049	0.049	0.049	0.049
水平地盤反力係数式 k_h	式(1)	式(2)	式(1)	式(2)

態での等価線形剛性を代表値としている。そのため、 E_d は、各種試験方法により取扱うひずみレベルや試験条件の特性の違いに応じて修正係数を乗じることによって算定する。しかし、ここでは、別途行っている薄層要素法と条件を合致させるために微小ひずみレベルを取扱うこととし、修正係数を1.0としている。

$$k_h = 0.65 \frac{Es}{(1-\nu_s^2)B} \cdot \sqrt[12]{\frac{Es \cdot B^4}{Ep \cdot Ip}} \quad (2)$$

ここに、 k_h は地盤反力係数、 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。

本モデルは、地盤と構造物を一体とした解析モデルとなっており、基盤位置への地震動の時刻歴波形の入力を想定した解析モデルとなっている。

解析条件は、入力波として図-3に示すホワイトノイズを使用した動的線形解析を行う。また、入力損失効果を評価するうえで構造物に入射される有効入力動が定義される位置は、モデルの構成要素により異なり、齊藤²⁾や原田¹¹⁾らの研究に代表されるように、基礎天端位置を有効入力動の定義位置とする場合もある。しかし、本検討においては地中梁前面の地盤反力を考慮していないことから、地盤 - 基礎系の相互作用を適切に評価するために有効入力動が定義される位置を杭頭位置とし、その位置における有効入力係数を算定することで入力損失効果の評価を行った。

以上の解析モデル、解析条件を用いて行う検討ケースを表-1に示す。

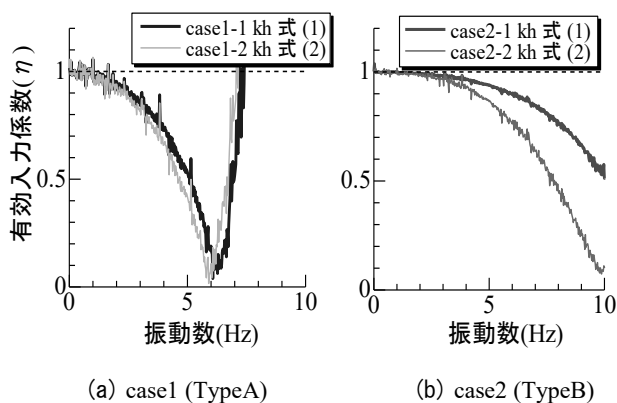


図-4 有効入力係数 (η) の比較

(2) 解析結果

各ケースに対して、有効入力係数を算出した結果を図-4に示す。有効入力係数は、低振動側では1.0であるが、case1では1Hz、case2では2Hz程度から低減が生じ、杭間隔が大きく、群杭効果が期待できないラーメン高架橋においても入力損失効果が発現されていることが確認できる。次に、地盤条件の違いを比較する。有効入力係数の減少に着目するとType Aでは6Hz程度で最も減少しているのに対し、Type Bでは10Hz程度となっている。また、式(2)を用いたケースの方が式(1)を用いたケースに比べ低振動数領域で低減が生じている。これは、Type AではType Bに比べ地表面付近の剛性が小さく、また式(2)を用いて算定した場合、式(1)に比べ地盤剛性が小さく算出される。これにより、地盤に対する杭の剛性が相対的に大きくなることで、杭による地盤の挙動を拘束する効果が大きくなり、入力損失効果が大きくなったと考えられる。

3. 有効入力係数の簡易評価手法

鉄道構造物の応答評価において一般的に使用される静的解析法では、地震作用として慣性力と地盤変位の影響を静的荷重に置き換えて考慮し応答値を算定する。このうち、構造物の応答評価に地盤変位の影響を考慮する手法として鉄道の耐震設計⁸⁾では応答変位法が導入されている。この手法を用いた構造物の応答評価に入力損失効果を考慮するためには、非線形応答スペクトル法と同様に、別途詳細な検討が必要となる。しかし、設計実務においては、作業の簡素化のため一般に無視される。

一方、2章の検討により1柱1杭形式のラーメン高架橋は、杭の剛性と地盤の剛性の相対的な差によって入力損失が生じていることが明らかとなった。

そこで、本章では有効入力係数を静的解析法において簡易に評価できる手法を提案し、一体型の動的解析結果と比較することで、提案手法の適用性を確認した。

(1) 評価手法の概要

地震時の基礎 - 地盤系の動的相互作用であるKinematic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。この場合、地盤変位に対する構造物の応答評価において、応答変位法を用いることで設計実務への適用性が高い。

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自由地盤の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構造物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を算出する。

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

なお、通常の地盤であれば、Step1で行う固有値解析において3次モードまで考慮すれば良い。

(2) 評価手法の適用性の検討

2章で行った検討ケースのうち水平地盤反力係数の算定に式(1)を使用したケース(case1-1、case2-1)について、本手法で有効入力係数を算定した。

case1-1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-6に示す。図に示す通り入力損失は、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によって生じており、地表面付近の地盤が軟らかい地層で顕著に表れている。これは、2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なることで地盤の変位に比べ杭基礎の変位が

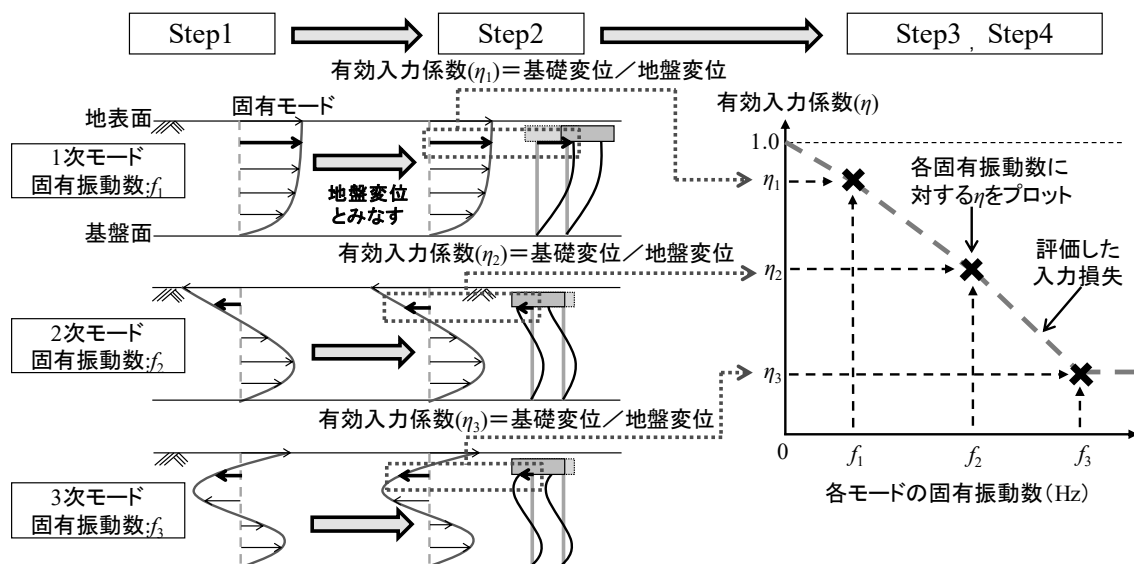


図-5 有効入力係数の評価手法の概要

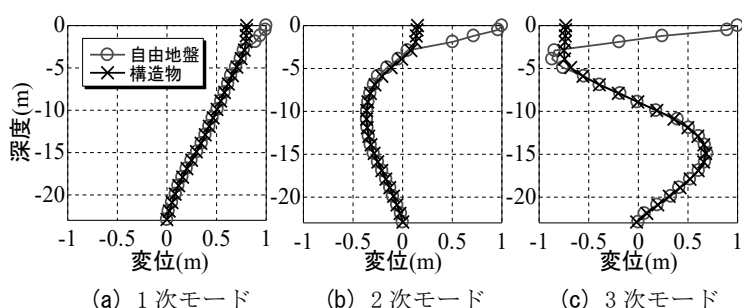


図-6 応答変位法による地盤変位分布と基礎の応答

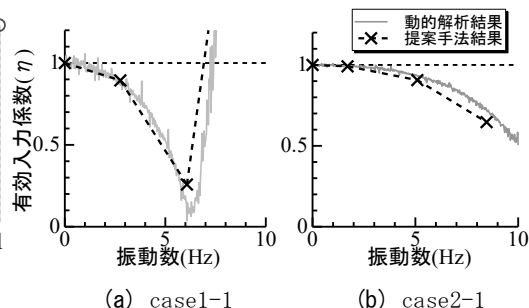


図-7 提案手法と動的解析法の比較

小さくなり、その結果、有効入力係数が低減している。

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の結果の比較を図-7に示す。提案手法を用いて算出した有効入力係数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効果を評価できることが確認できる。

4. 入力損失を考慮した応答スペクトルの簡易評価手法

3章で提案した有効入力係数（入力損失）を使用して応答スペクトルを低減することができる。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、これに対して時間領域における逐次積分法により応答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、入力損失効果を考慮した構造

物の応答評価をランダム振動論を用いることで、直接的に応答スペクトルを補正する簡易な手法を提案する。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。さらに、ラーメン高架橋の入力損失効果が構造物の応答に与える影響を確認する。

(1) ランダム振動論に基づく応答スペクトルの評価手法

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を求めることで構造物の最大応答を評価する¹²⁾。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(3)で表わされる。

$$\sigma_a(\omega_0, h) = \sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} |H_a(\omega_0, h, \omega)|^2 \cdot G_a(\omega) d\omega} \quad (3)$$

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、

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

である。ここで、式(4)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行値から最大加速度応答を求めるためには、ピークファクターが必要となる。Rosenblueth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¹³⁾。

$$S_a(\omega_0, h) = \omega_0 \sqrt{\frac{\pi G_a}{2h\omega_0}} \cdot \sqrt{1 - \exp(-2h\omega_0 t_d)} \cdot \sqrt{2 \sqrt{0.424 + \ln(2h\omega_0 t_d + 1.78)}} \quad (5)$$

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(3)の積分を実行すると、式(6)が得られる。

$$\sigma_a(\omega_0, h) = \sqrt{\frac{\omega_0 \pi G_a}{2h}} \quad (6)$$

また、式(5)と(6)から、 $G_a(\omega)$ を消去すると、式(7)となる。

$$S_a(\omega_0, h) = \sigma_a(\omega_0, h) \cdot \sqrt{1 - \exp(-2h\omega_0 t_d)} \cdot \sqrt{2 \sqrt{0.424 + \ln(2h\omega_0 t_d + 1.78)}} \quad (7)$$

式(7)を用いる場合、 $\sigma_a(\omega_0, h)$ は、式(6)ではなく式(3)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(8)を採用していることになる。

$$p = \sqrt{2 \sqrt{0.424 + \ln(2h\omega_0 t_d + 1.78)}} \quad (8)$$

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(9)、(10)となる。

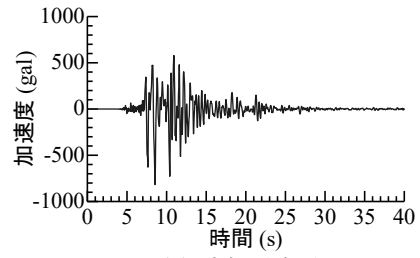
$$S_a^{org}(\omega_0, h) = \sigma_a^{org}(\omega_0, h) \cdot \sqrt{1 - \exp(-2h\omega_0 t_d)} \cdot \sqrt{2 \sqrt{0.424 + \ln(2h\omega_0 t_d + 1.78)}} \quad (9)$$

$$S_a^{mod}(\omega_0, h) = \sigma_a^{mod}(\omega_0, h) \cdot \sqrt{1 - \exp(-2h\omega_0 t_d)} \cdot \sqrt{2 \sqrt{0.424 + \ln(2h\omega_0 t_d + 1.78)}} \quad (10)$$

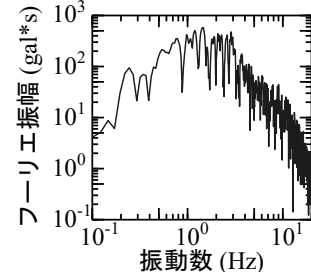
これにより、式(9)と式(10)から構造物の応答スペクトル比は式(11)となり、式(3)を用いると式(12)で表わすことができる。

$$R = \frac{S_a^{mod}(\omega_0, h)}{S_a^{org}(\omega_0, h)} = \frac{\sigma_a^{mod}(\omega_0, h)}{\sigma_a^{org}(\omega_0, h)} \quad (11)$$

$$R = \sqrt{\frac{\int_{-\infty}^{\infty} |H_a(\omega_0, h, \omega)|^2 \cdot \{\eta(\omega)\}^2 \cdot G_a(\omega) d\omega}{\int_{-\infty}^{\infty} |H_a(\omega_0, h, \omega)|^2 \cdot G_a(\omega) d\omega}} \quad (12)$$



(a) 時刻歴波形



(b) フーリエ振幅スペクトル

図-8 時刻歴波形およびフーリエ振幅スペクトル

ここで、 $\eta(\omega)$ は有効入力係数である。

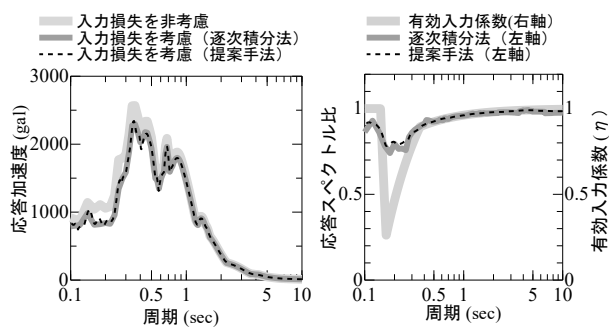
本提案手法では、式(12)を用いることで入力損失効果を考慮した構造物の応答を評価する。

(2) 提案手法を用いた構造物の応答評価

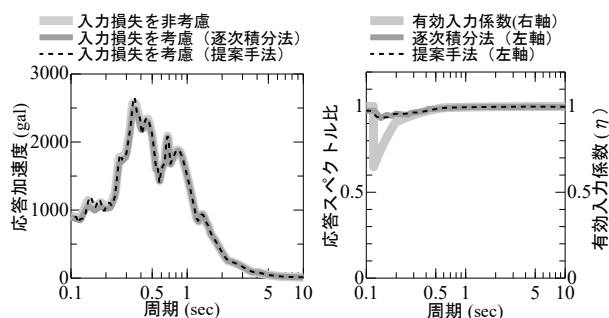
提案式の適用性および入力損失効果が構造物に与える影響を検討するために、式(12)と時間領域における逐次積分法により解いた弾性加速度応答スペクトルを比較する。検討に用いた地震動は図-8に示す1995年の兵庫県南部地震の神戸海洋気象台で観測された記録(KOB波)を使用した。また、構造物の減衰定数を5%とし、有効入力係数は図-7のうち応答変位法を用いて算出したcase1-1、2-1の結果を用いた。

上記の条件により算出した弾性加速度応答スペクトルおよび入力損失を考慮して算出した応答スペクトルと入力損失を考慮しないで算出した応答スペクトルの比を図-9、図-10に示す。また、図-9(b)、10-(b)には、検討に用いた有効入力係数を併せて示す。弾性加速度応答スペクトルの低減は、短周期領域において顕著にみられ、有効入力係数が最も小さくなる周期付近で最も低減する。また、case2-1に比べ地表面付近の地盤剛性が小さいcase1-1の方が、応答スペクトルの低減領域が広く、低減割合も大きい。これは、第2、3章で述べた結果と調和的な傾向を示している。

次に提案手法に対し、逐次積分法の結果を比較すると、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、本提案手法を用いて入力損失効果を考慮した構造物の応答を精度よく評価できることが確認できる。



(a) 弾性加速度応答スペクトル (b) スペクトル比
図-9 case2-1 弾性加速度応答スペクトルの比較



(a) 弾性加速度応答スペクトル (b) スペクトル比
図-10 case2-1 弾性加速度応答スペクトルの比較

5. おわりに

本研究では、1柱1杭形式のラーメン高架橋を対象に、Kinematic相互作用による入力損失効果について検討した。また、入力損失効果および入力損失効果を考慮した構造物応答の簡易な評価手法を提案し、その適用性について検討した。本検討により以下のことが明らかとなった。

- ・群杭効果が期待できないラーメン高架橋においても入力損失が生じている。また、杭の剛性に対して地盤の剛性が相対的に小さいほど、地震波の波長が短くなる高次モードほど入力損失は大きい。

- ・入力損失による構造物応答の低減は、短周期領域において顕著に表われる。

- ・有効入力係数と応答スペクトルを簡易に評価できる手法を提案し、提案手法の精度検証を行った。これにより、静的解析法に容易に入力損失を考慮することができ、より合理的な耐震設計が可能となった。

本研究では、地盤、構造物を線形として検討を実施したが、今後は、より詳細に地盤 - 基礎系のKinematic相互作用の影響を把握するため、地盤、構造物の非線形性を考慮した検討を行っていく。

参考文献

- 1) 山原 浩：地震時の地動と地震波の入力損失（第1報），日本建築学会論文報告集，第165号，pp.61-66，1969.
- 2) 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/I-63，pp.317-330，2003.
- 3) 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，清水建設研究報告，第46号，pp.25-34，1987.
- 4) Takemiya H.：Ring-pile analysis for a grouped pile foundation subjected to base motion，土木学会論文集，第368号/I-5. Structural Eng. Earthquake. Eng. Vol.1.3, No.1, pp.207-214，1986.
- 5) Kazuo Konagai：An Upright Single Beam Equivalent to Grouped Piles，生産研究 50巻9号，pp.13-16，1998.
- 6) Konagai,K.,Yin,Y.and MURONO,Y.：Single beam analogy for describing soil pile group interaction，Soil Dynamics and earthquake Engineering，23(3)，213-221，2003.
- 7) H.Tajimi：A Contribution to Theoretical Prediction of Dynamic Stiffness Surface foundation，Proc.of 7th WCEE, Vol.5, pp.105-112，1980.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) Vesic. A. B：Bending of Beams Resting On Isotropic Elastic Solid, Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, EM2, pp.35-53, 1961.
- 11) 原田隆典，山下典彦，坂梨和彦：地盤との動的相互作用を考慮した道路橋橋脚の周期と減衰定数に関する理論的研究，土木学会論文集，No.489/I-27，pp.227-234，1994.
- 12) 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.
- 13) Rosenblueth, E. and Bustamante, J. I.：Distribution of Structural Response to Earthquakes, Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, EM3, pp.75-106，1962.