

杭基礎を有するラーメン高架橋の構造全体系による 入力損失の評価手法に関する研究

寶地 雄大¹・室野 剛隆²・齊藤 正人³・和田 一範¹

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 博士（工学） （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）

³正会員 博士（工学） 埼玉大学 理工学研究科
（〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久255）

1. はじめに

基礎を有する構造物では、地盤 - 構造物系の動的相互作用により入力損失が生じることが知られている^{1),2)}。入力損失に関する研究は、これまで群杭基礎やケーソン基礎などの大型基礎を対象に橋軸直角方向のある断面を切出した 2 次元解析による検討が多数行われてきた³⁾⁻⁶⁾など。一方で、鉄道構造物の中で採用実績が多い 1 柱 1 杭形式のラーメン高架橋のような構造は、杭間隔が広く群杭効果が期待できないことから十分な検討がなされてきていない。そこで、筆者ら⁷⁾は 1 柱 1 杭形式のラーメン高架橋を対象に、2 次元モデルによる動的解析を行うことで杭基礎による入力損失効果を検討し、群杭基礎を有する構造物と同等程度の効果があることを明らかにした。しかし、ラーメン高架橋のように橋軸方向にも各構造部材が一体となった構造では、上部構造物の効果により、地震時において構造物全体が周辺地盤の挙動を拘束することでより大きな入力損失を発現する可能性がある。一方で、入力損失効果を構造物の応答値算定に考慮することで実現現象に即した設計が可能となる。そのため、上述のとおり構造全体系の挙動により、より大きな入力損失効果を見込めるのであれば、その効果を簡易に評価し、応答値算定に考慮できることが望ましい。

そこで、本検討では 1 柱 1 杭形式のラーメン高架橋を対象に 2 次元、3 次元モデルによる動的解析を行い両者の結果を比較することで、構造全体系から生じる入力損失効果について定量的に評価した。さ

らに、構造全体系の入力損失効果の簡易な評価手法を提案し、その妥当性を 3 次元モデルによる動的解析の結果と比較することで検討した。

2. 構造全体系による入力損失効果

(1) ラーメン高架橋全体系における有効入力動

ラーメン高架橋は、基礎、柱、梁が結合された立体的な構造となっている。このような構造物では、例えば橋軸直角方向の挙動を考えた場合、各地点で構造物に入射される地震動が一樣（位相差なし）な場合には、橋軸方向の梁などの部材剛性はラーメン高架橋全体の挙動に影響を及ぼすことはない。よって、図-1 に示すような SR モデルや 1 自由度系のモデルでその挙動を概ね表現できる。一方、入力に位相差がある場合には、橋軸方向の各部材の剛性が図-2 のようなラーメン高架橋全体系の挙動に影響を及ぼすことは明らかである。しかし、図-1 のようなモデル化方法では、橋軸（面外）方向を考慮していないため、その効果を取り入れることはできない。そのため、構造全体系の剛性により発現される幾何学的相互作用の影響、つまり、橋軸方向の部材剛性による地動を拘束、鈍化させる働きは、いわゆる、有効入力動として入力で評価する必要がある。よって、杭を有するラーメン高架橋では、橋軸直角方向の杭による入力損失効果と橋軸方向の上部構造物の剛性による入力損失効果からなる構造全体系の入力損失効果を適切に評価する必要がある。

そこで、本章では、構造全体系による入力損失効

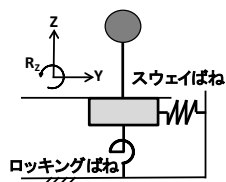


図-1 SR モデル

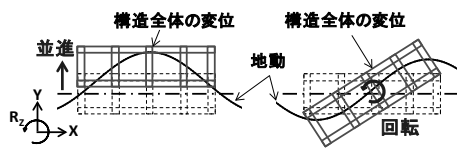
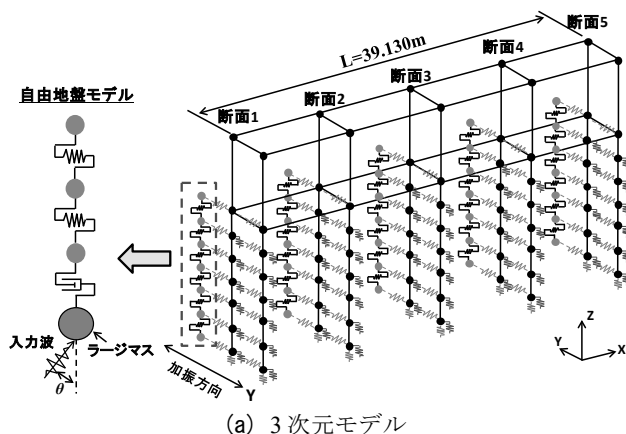


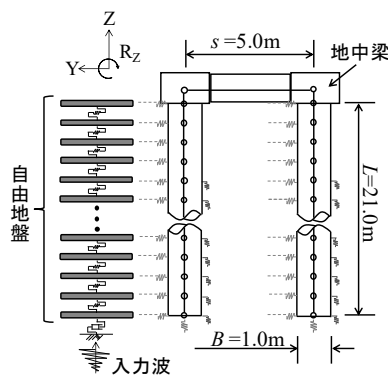
図-2 高架橋全体の挙動

表-1 入射角 θ と時間差の関係

項目	$\theta = 7^\circ$				
	断面1	断面2	断面3	断面4	断面5
柱位置座標 L (m)	0.000	9.565	19.565	29.565	39.130
時間差 t (sec)	0.000	0.012	0.024	0.037	0.049
項目	$\theta = 14^\circ$				
	断面1	断面2	断面3	断面4	断面5
柱位置座標 L (m)	0.000	9.565	19.565	29.565	39.130
時間差 t (sec)	0.000	0.024	0.049	0.074	0.098



(a) 3次元モデル



(b) 2次元モデル

図-3 解析モデルの概要

果について、2次元、3次元モデルによる動的解析を行い両者を比較することで検討を行う。

(2) 解析モデルおよび条件

本検討では、1柱1杭形式のラーメン高架橋を対象に検討を行う。対象とするラーメン高架橋の3次元モデルの概要を図-3(a)に示す。モデル化は、地盤・構造物系の動的相互作用を表現するために、ここでは、杭、梁、柱からなる構造物系と構造物の振動の影響を受けない自由地盤系の2つの系から構成したモデルを質点系の梁ばねモデルにより構築した。また、自由地盤と構造物のそれぞれの系は相互作用ばねを介して連結されている。このモデルは、Penzien⁸⁾らや後藤・亀田⁹⁾が検討に用いた手法であり、杭側方から地盤の変形が地盤ばねを介して構造物系に入力されることで動的相互作用を表現するモデルである。解析モデルのうち自由地盤は、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ている。また、土柱モデルには後述する地震波の斜め入射を可能とするために、ラーメン高架橋の各断面に同一の土柱モデルを構築し、基盤位置に十分な質量を有するラージマスを設定した。一方、構造物系は、構造全体系の動的相互作用を表現するために、杭、地中梁に加え柱、上層梁の上部構造物についても梁要素でモデル化した。また、動

的相互作用のうち幾何学的な相互作用を抽出するために、構造物の質量は無視している。

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 Vesic¹⁰⁾が提案した式(1)を適用し評価している。

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

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 には群杭効果を考慮した。その他の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は、鉄道の設計基準^{11),12)}に基づき設定した。

一方、比較対象である2次元モデルは図-3(b)に示すとおり、自由地盤、杭・地中梁の2つの系からなるモデルを3次元モデルと同条件で作成した。

次に、解析条件として、自由地盤は表層地盤が均一な土層とし、初期せん断波速度 V_{s0} を100m/sとした。また、表層地盤高さを20.0mとし、その下端には V_{s0} が400m/sの基盤層を想定している。一方、構造物は、1径間が10m程度の4径間のラーメン高架橋とし、杭は、杭径1.0m、杭長21.0m、橋軸直角方向の杭間隔を5.0mとしている。また、杭は先端が支持され、杭頭部が地中梁に剛結している条件とした。さらに、ここでは、検討を単純化するために構造物における地中梁、上層梁を剛梁としている。

入力地震動は、地表面位置において 7° 、 14° の

入射角を想定し、橋軸直角方向を対象にラージマスに入力した。これにより、表-1 に示す通り、入射角に応じて各断面に時間差が生じることとなる。なお、解析は表-2 に示す 3 ケースについて、入力地震動にホワイトノイズを用いた動的線形解析を行っている。

構造全体系の入力損失効果の検討は、上記条件において算定された自由地盤地表面の応答に対する基礎の応答の比を比較することで行った。ここで、この比の意味は、自由地盤の地震動に対する構造物に入射される地震動の倍率を示しており、この比をここでは有効入力係数 η と呼ぶこととする。なお、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の比によって算定している。

(3) 解析結果

解析から得られた Case1, Case3 の橋軸直角方向における加速度波形の比較を図-4 に示す。なお、Case2 は Case3 と同様の傾向が得られているためここでは省略する。また、図中の断面位置については図-3(a) を参照されたい。図-4 から明らかなように、自由地盤地表面位置の加速度波形に比べ Case1, Case3 の杭頭位置の加速度波形は、加速度振幅が小さくなっており入力損失が生じている。ここで、Case1 は橋軸方向の縦梁を考慮しない 2 次元モデルであるため、杭基礎の曲げ剛性に起因して入力損失が生じていると言える。また、杭頭位置の加速度波形をみると Case3 は Case1 に比べさらに加速度振幅が小さくなっている。Case3 では、各地点における地動が異なる（位相がある）ため縦梁の剛性により、地動を拘束しようとする効果が生じる。その結果、構造物全体の挙動は並進に加え、回転運動となる。図-4 のうち杭頭位置の回転角加速度に着目すると、回転角加速度が 0 になる時刻で 1~5 断面の加速度波形が交わっている。また、断面 3 の杭頭位置の加速度波形は各断面の波形を平均した波形となっている。このことから、断面 3 が回転中心となっていることがわかる。つまり、図-5 のような運動をしており、断面 3 の挙動が並進運動を代表し、それ以外の断面の運動には回転運動の影響が重なっていると言える。

次に、入力損失効果について比較を行う。図-6 に各ケースにおいて算定された有効入力係数 η の比較を示す。初めに、断面 3 に着目すると、Case1 の杭による入力損失効果のみを考慮した場合に対して、Case2, Case3 の杭も含めた構造全体の剛性を考慮した場合の方が、有効入力係数 η の低減が大きく、よ

表-2 解析ケース

Case	解析モデル	入射角 θ (deg)
Case1	2次元	-
Case2	3次元	7
Case3	3次元	14

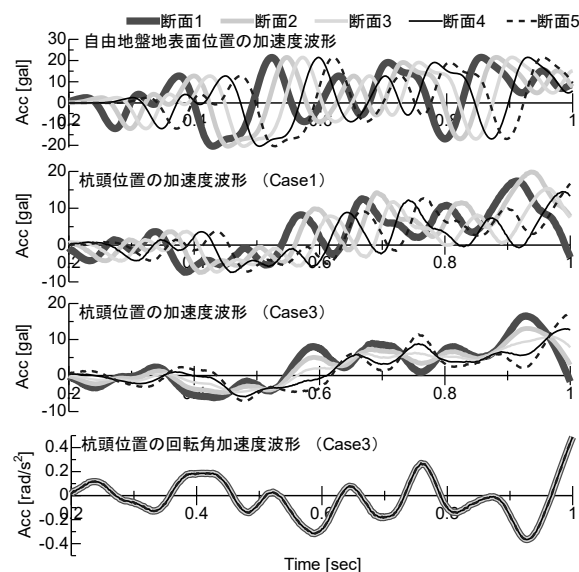


図-4 加速度波形の比較 (0.2 秒～1 秒)

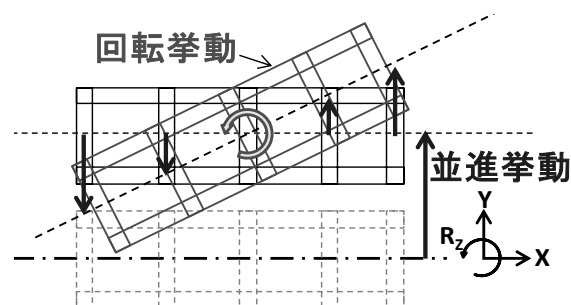


図-5 高架橋全体の並進、回転挙動

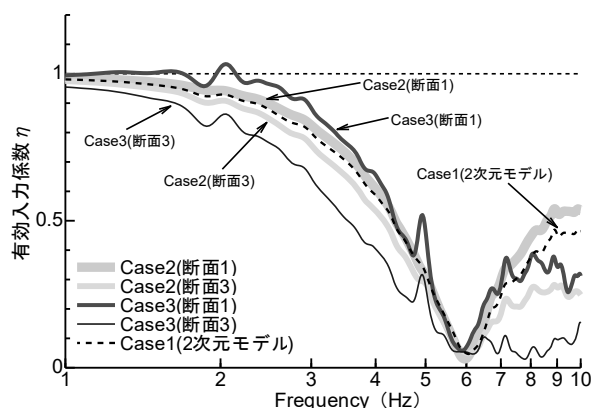


図-6 有効入力係数 η の比較

り大きい入力損失効果が発現されている。これは、前述したように、杭に加え橋軸方向の剛性を考慮することで、地動を拘束しようとする効果が生じ、その結果、構造物全体の並進方向の挙動が小さくなる

ためである。これは、図-4 のうち Case3 の杭頭位置の加速度波形からもわかる。一方で、断面 1 に着目すると Case1 に比べ Case2, Case3 の有効入力係数 η の低減は僅かに小さく、入力損失効果が小さい。これは、前述したとおり橋軸方向の剛性の影響により並進方向の挙動は小さくなるものの、ラーメン高架橋端部に位置する断面 1 では、高架橋の回転挙動に伴い水平挙動が大きくなることに起因している。ただし、大局的には、構造物全体系の入力損失効果を考慮した Case2, Case3 の方が杭基礎による入力損失のみを考慮した Case1 に比べ大きな入力損失効果が発揮されている。

3. 構造全体系による入力損失の簡易な評価

2 章の検討により、杭のみを対象とした場合に比べ、構造全体としての剛性を考慮することで、より大きな入力損失効果が発現されることが明らかとなった。この構造全体系による入力損失効果を地震時における構造物の応答値算定に考慮することで、実現に即した設計が可能となる。そのため、ここでは構造全体系における入力損失効果を簡易に評価する手法を提案し、その妥当性を検討する。

(1) 提案手法の概要

2 章の検討から明らかなように、構造全体系の入力損失は、地盤 - 杭基礎系の動的相互作用により発現される効果（以下、「杭基礎による効果」と呼ぶ）と杭基礎を除く地中梁、柱、上層梁が連結された構造物が地動に対して一体となって挙動することで発現される効果（以下、「上部構造物による効果」と呼ぶ）の 2 つの組合せで評価できる。前者は、2 章の検討のうち橋軸方向の影響を考慮せず杭基礎のみをモデル化した Case1 の結果が該当する。また、前者と後者の効果を含んだ入力損失は、2 章の検討のうち橋軸方向についてもモデル化した Case2 と Case3 が該当する。よって、後者は Case2 または Case3 の効果と Case1 の効果の差分といえよう。そこで、本提案手法では図-7 に示すように構造全体系の入力損失効果を杭基礎による効果 $\eta_1(\omega)$ と上部構造物による効果 $\eta_2(\omega)$ の重ね合わせにより表現する。具体的には、杭基礎による幾何学的相互作用の効果を含んだ有効入力動 $\ddot{Z}(\omega) \cdot \eta_1(\omega)$ が質量がない剛性のみを考慮した上部構造物に入射されることで、「上部構造物による効果」が発揮されると考えると、2 つの効果の重ね合わせの解は、周波数領域で解くことで両者のかけ合わせによって求めることができ

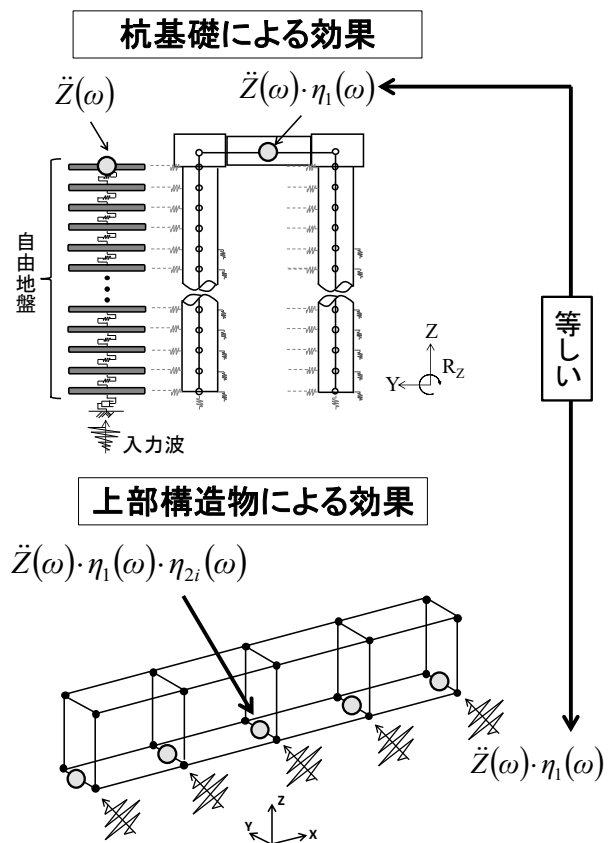


図-7 提案手法の概要

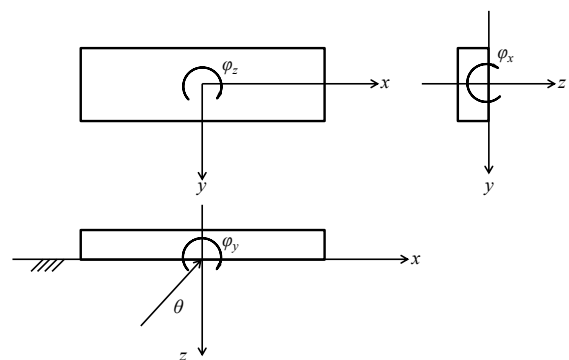


図-8 地震動を受ける無質量基礎

る。また、それぞれの効果の算定について、杭基礎による効果である $\eta_1(\omega)$ は、著者ら⁷⁾が提案した応答変位法を用いた評価によって算定することができる。そのため、以降では上部構造物による効果である $\eta_2(\omega)$ に着目し、その評価手法を述べる。

(2) 上部構造物による効果の評価

評価にあたって、ここでは表層地盤は一層地盤とし、上部構造物を剛な無質量基礎と仮定し、図-8 に示すように地震動が θ の角度で入射すると考えた。ここで、基礎は無質量であるため地震動を受けた際に慣性効果がなく、その動きは地盤の動きに支配さ

れる．そこで，基礎の挙動は地動変位との差が最も小さくなるように挙動すると考える．ここに，自由地盤の地表面位置 ($Z=0$) での変位を U_g とする．

$$U_g = \begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix} \quad (2)$$

一方，基礎の水平変位および回転変位をそれぞれ U^* ， Φ^* とする．

$$U^* = \begin{Bmatrix} u_x^* \\ u_y^* \\ u_z^* \end{Bmatrix}, \quad \Phi^* = \begin{Bmatrix} \phi_x^* \\ \phi_y^* \\ \phi_z^* \end{Bmatrix} \quad (3)$$

地動と無質量基礎の変位との差分の 2 乗和 W は，

$$\begin{aligned} W = & \int_A \left\{ (u_x^* - y\phi_z^*) - u(x,y) \right\}^2 dA \\ & + \int_A \left\{ (u_y^* + x\phi_z^*) - v(x,y) \right\}^2 dA \\ & + \int_A \left\{ (u_z^* + y\phi_x^* - x\phi_y^*) - w(x,y) \right\}^2 dA \end{aligned} \quad (4)$$

と表わすことができる．ここで A は基礎面積を表す．式(4)の右边第 1 項は x 方向に関する基礎と地動の変位差の 2 乗和を，第 2 項，第 3 項は y 方向および z 方向の変位差の 2 乗和を表している．ここで，後述する検討において必要となる y 成分および ϕ_z 成分に関して W が最小となる事を考え並進・回転成分について偏微分を行う．まず， y 方向についておこなうと，

$$\frac{\partial W}{\partial u_y^*} = 0 \quad (5)$$

とし，式(4)に式(5)を代入すると

$$u_y^* = \frac{1}{A} \int_A v(x,y) dA \quad (6)$$

となる．一方， ϕ_z に関しても同様に偏微分を行うと，

$$\phi_z^* = \frac{1}{\int_A (x^2 + y^2) dA} \cdot \int_A \{ x \cdot v(x,y) - y \cdot u(x,y) \} dA \quad (7)$$

となる．

次に，図-9 に示すような SH 波が斜め入射する場合を想定する．ここで，入射角が θ の場合，水平方向の見かけの伝搬速度 V は，

$$V = \frac{V_s}{\sin \theta} \quad (8)$$

となる．このとき，自由地盤の地表面 ($z=0$) における y 方向変位は，

$$v(x,y) = v_0 \cdot \exp \left(-i \frac{2\pi}{\lambda} x \right) \quad (9)$$

と表わされる．ここに， v_0 は入射波の振幅を表す．

また，波長 λ は，

$$\lambda = \frac{V}{f} = 2\pi \frac{V}{\omega} \quad (10)$$

であるため，式(9)は式(11)となる．

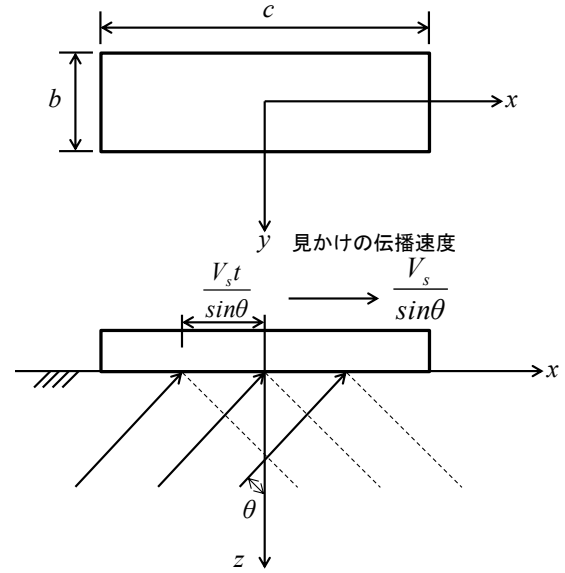


図-9 SH 波を受ける無質量基礎

$$v(x,y) = v_0 \cdot \exp \left(-i \frac{2\pi}{2\pi(V/\omega)} x \right) = v_0 \cdot \exp \left(-i \frac{\omega}{V} x \right) \quad (11)$$

次に，式(11)に式(8)を代入すると，

$$v(x,y) = v_0 \cdot \exp \left(-i \frac{\omega}{\left(\frac{V_s}{\sin \theta} \right)} x \right) = v_0 \cdot \exp \left(-i \frac{\omega \sin \theta}{V_s} x \right) \quad (12)$$

となる．式(12)は SH 波における y 方向の地動変位を表しており，式(6)に式(12)を代入することで， y 方向における基礎入力動が式(13)となる．また，式(7)に式(12)を代入することで， ϕ_z 方向における基礎入力動が式(14)のように求められる．

$$u_y^* = \frac{1}{A} \int_A v_0 \cdot \exp \left(-i \frac{\omega \sin \theta}{V_s} x \right) dA \quad (13)$$

$$\phi_z^* = \frac{1}{\int_A (x^2 + y^2) dA} \cdot v_0 \cdot \int_A x \cdot \exp \left(-i \frac{\omega \sin \theta}{V_s} x \right) dA \quad (14)$$

式(13)，式(14)について積分を実行すると， y 方向， ϕ_z 方向の基礎入力動は式(15)，式(16)となる．

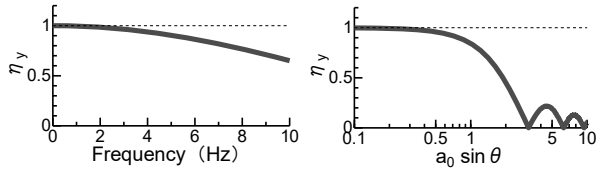
$$u_y^* = v_0 \cdot \frac{\sin(a_0 \sin \theta)}{a_0 \sin \theta} \quad (15)$$

$$\phi_z^* = i \cdot v_0 \cdot \frac{6c}{(b^2 + c^2)} \left\{ \frac{\cos(a_0 \sin \theta)}{a_0 \sin \theta} - \frac{\sin(a_0 \sin \theta)}{(a_0 \sin \theta)^2} \right\} \quad (16)$$

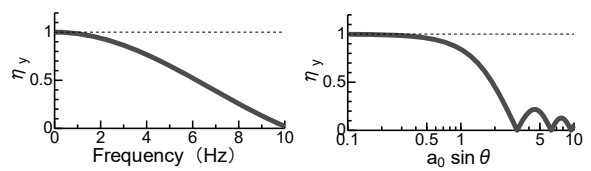
ここで， a_0 は無次元化振動数であり式(17)で表わされる．

$$a_0 = \frac{c\omega}{2V_s} \quad (17)$$

また，式(16)の ϕ_z 方向成分には虚数が含まれている．

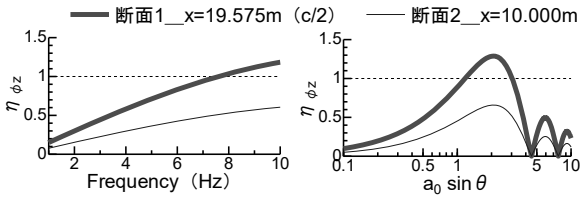


(a) Case2 (入射角 $\theta=7^\circ$)

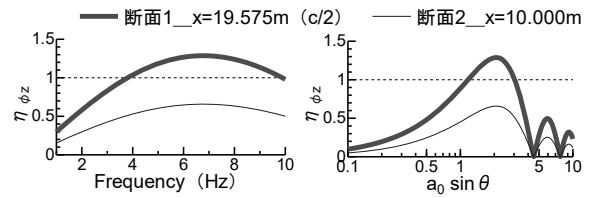


(b) Case3 (入射角 $\theta=14^\circ$)

図-10 y方向の入力損失効果



(a) Case2 (入射角 $\theta=7^\circ$)



(b) Case3 (入射角 $\theta=14^\circ$)

図-11 ϕ_z 方向の入力損失効果

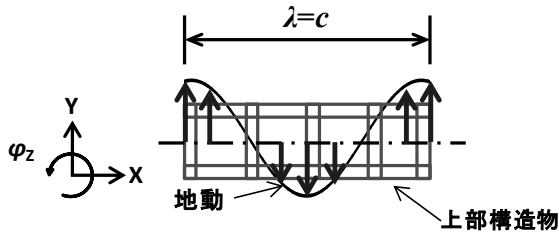


図-12 y方向の入力損失効果が最大となる状態における地動と構造物の関係

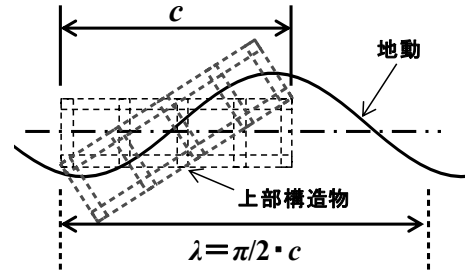


図-13 ϕ_z 方向の回転振幅が最大となる状態における地動と構造物の関係

これは、 y 方向成分は地動と同位相で挙動するのに対して、 ϕ_z 方向成分は地動と $\pi/2$ だけ位相がずれていることを意味している。そして、式(15)、式(16)から算定される基礎入力動を入射波の振幅で除すことで、上部構造物による効果 η_2 は、式(18)となる。

$$\eta_{2i} = \frac{u_y^* + |\phi_z^*| \cdot x_i}{v_0} \quad (18)$$

ここで、 i は断面番号、 x_i は回転中心となる断面 3 から η_{2i} を算定する当該断面までの距離を表す。式(18)では、回転挙動に当該断面までの距離を乗じることで水平方向の挙動に変換していることがわかる。ただし、回転中心である断面 3 は距離が 0 であるため並進成分だけが残ることとなる。

また、式(18)から算定される上部構造物による効果と杭基礎による効果の重ね合わせを式(19)で表現することで、構造全体の入力損失効果を評価する。

$$\eta_i(\omega) = \eta_1(\omega) \cdot \eta_{2i}(\omega) \quad (19)$$

(3) 提案手法による入力損失効果の算定

ここでは、上述の算定式から y 方向（並進）および ϕ_z 方向（回転）の基礎入力動を算定することで、上部構造物による入力損失効果について概観する。なお、地震動や構造物の条件は、3 章の条件を用いて検討を行っている。

式(15)、式(16)より算定した基礎入力動を y 方向については図-10 に、 ϕ_z 方向については図-11 に示す。同図では縦軸に基礎入力動を入射波の振幅で除した値、すなわち有効入力係数 η (η_y , η_{ϕ_z}) を表し、横軸に振動数と無次元化振動数 a_0 に $\sin\theta$ かけた場合の 2 つの図を示している。ここで、 $a_0 \sin\theta$ は $a_0 \sin\theta = c\omega \sin\theta / (2Vs)$ であることから、 $a_0 \sin\theta$ の増加は振動数 $f = \omega / 2\pi$ の増加を表わしている。また、地表位置における見かけの波長 ($\lambda = Vs / (f \sin\theta)$) の減少を表わしている。さらに、 a_0 は振動数を $f = \omega / 2\pi$ 、地表位置における見かけの波長 $\lambda = Vs / f \sin\theta$ すれば、 $a_0 \sin\theta = \pi c / \lambda$ で表わすことができる。したがって、 a_0

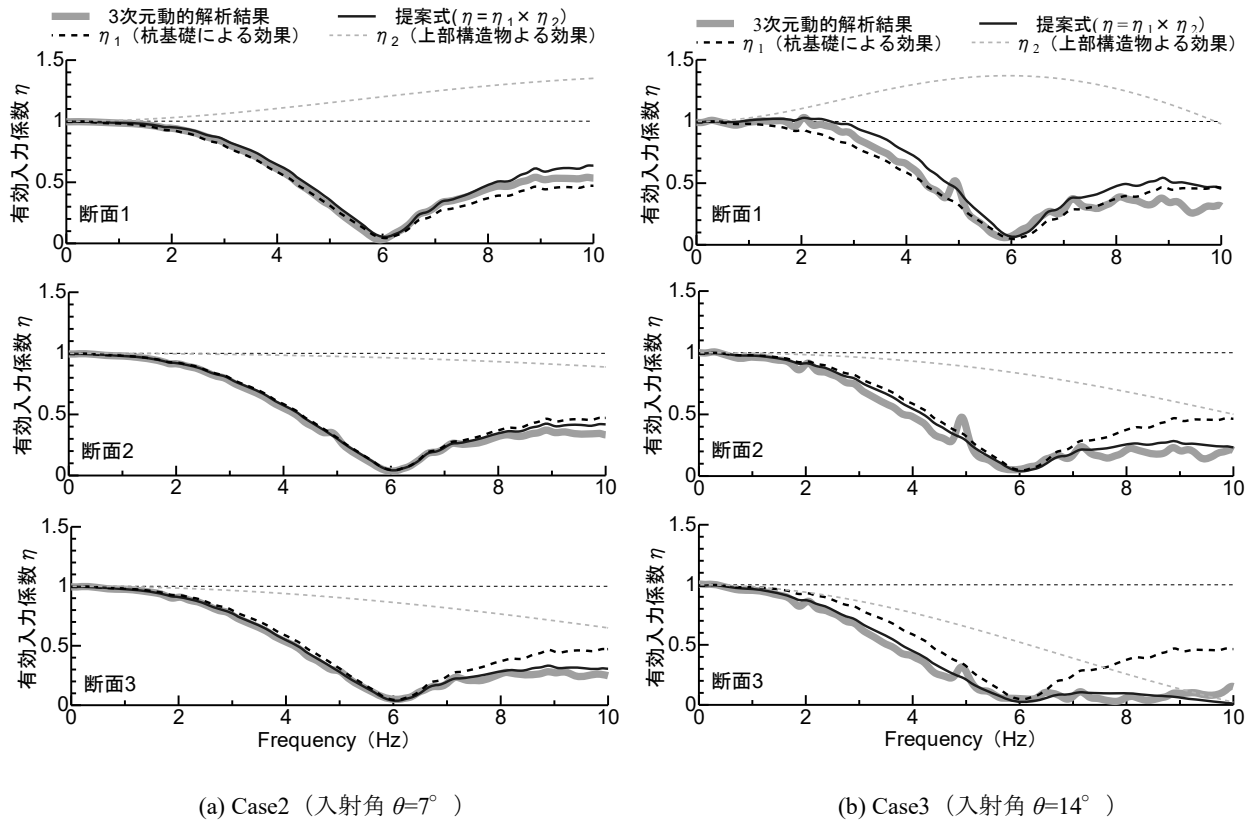


図-14 提案手法と動的解析結果の比較

$\sin\theta$ は見かけの波長 λ と上部構造物の長さ c との比に関するパラメーターと考えることができる。

初めに、図-10 より y 方向についてみると、地震動の入射角が大きいくほど η_y の低減が大きく入力損失効果が大きい。また、振動数および $a_0 \sin\theta$ が大きくなるにつれて η_y が低減している。これは、高振動数になるにつれて上部構造物の長さ c に対して、地動の波長が短くなり上部構造物による地動を拘束する効果が大きくなり、その結果入力損失効果が大きくなったと考えられる。さらに、 $a_0 \sin\theta$ によって正規化することで入射角 θ によらず η_y を評価できることがわかる。 $a_0 \sin\theta$ で正規化した図では π の倍数で η_y の値が 0 となっている。これは、 $a_0 \sin\theta = \pi c / \lambda$ のうち、 $c/\lambda = 1, 2, 3, \dots$ の状態である。したがって、図-12 に示すとおり上部構造物の長さ c に対して地表面位置における見かけの波長 λ が c の倍数となっていることを表わしており、地動の作用が正負で相殺され上部構造物が動かない状態を意味している。

次に、図-11 から φ_z 方向についてみると、回転中心からの距離 x が大きいほど、入射角 θ が大きいほど低振動数帯において $\eta_{\varphi z}$ が大きくなり、入力損失効果が小さい。また、 y 方向と同様に $a_0 \sin\theta$ によって正規化することで入射角 θ によらず $\eta_{\varphi z}$ を評価できることがわかる。さらに、 φ_z 方向における

$\eta_{\varphi z}$ のピークは $a_0 \sin\theta \approx 2$ の時に生じている。これは、図-13 に示すように地表面の見かけの λ が上部構造物の長さ c の約 $1.57(\pi/2)$ 倍の場合に相当する状態であり、このとき、 $\eta_{\varphi z}$ は 1.3 程度まで達していることがわかる。また、 $\eta_{\varphi z}$ が 0 となるとき $a_0 \sin\theta$ は $\pi + \pi/2, 2\pi + \pi/2, \dots$ と y 方向において η_y の値が 0 となる $a_0 \sin\theta$ が π の倍数であったのに対して、 $\pi/2$ だけ位相がずれている。これは、並進挙動が最大となる状態において回転挙動は生じておらず、それとは逆に回転挙動が卓越する状態において並進挙動は生じていないことを意味している。これは、前述した式(16)中に虚数が含まれていることからわかる。

(4) 提案手法の妥当性の検証

前節で提案した評価手法の妥当性を検証するために、2章で得られた動的解析と式(19)から得られた有効入力係数 η を比較する。

両者の有効入力係数 η の比較を図-14 に示す。図中には2章で得られた動的解析結果と提案手法によって算定した η (式(19)) の結果と併せて、杭基礎による効果 η_1 と上部構造物による効果 η_2 (式(18)) の結果を示す。なお、 η_1 については、ここでは、図-14 のうち Case1 の結果を用いている。同図より、提案手法から算定した有効入力係数 η は、1Hz 付近

まではその低減がなく単調に推移する。そして、1Hz より低減が始まり 6Hz まで緩やかに減少し、6Hz 以上の高振動数帯では低い値を維持している。また、 η_2 に着目すると断面 1 では 1.0 を超える値を示している。これは、断面 1 は回転中心である断面 3 からの距離が大きく回転による水平挙動が他の断面に比べ大きくなることに起因している。このため、回転中心からの距離が大きくなると、並進成分に比べ回転成分の影響が支配的になるといえる。一方で、回転挙動の影響を受けない断面 3 では、構造全体系の入力損失効果を表す η が、 η_2 （上部構造物による効果）の影響により η_1 （杭基礎による効果）を下回っている。すなわち、橋軸方向の構造物の挙動を考慮することで、より大きな入力損失効果が生じている。

次に、提案手法と動的解析の結果を比較すると、提案手法の結果は、動的解析の結果と調和的であり本手法により精度良く橋軸方向の影響を考慮した構造全体系の入力損失効果を評価できることがわかる。

5. まとめ

本検討では 1 柱 1 杭形式のラーメン高架橋を対象に 2 次元、3 次元モデルによる動的解析を行い、その結果を比較することで構造全体系から生じる入力損失効果について定量的に評価した。その結果、以下の結論を得た。

- ・構造全体系の挙動に伴う入力損失は、杭基礎の曲げ剛性及び構造物全体系が有する橋軸方向の水平剛性（梁剛性）により生じることが明らかとなった。
- ・上記により、杭の曲げ剛性のみから発現される入力損失効果に比べ、より大きな入力損失効果が生じることが明らかとなった。

次に、構造全体系の入力損失効果の簡易な評価手法を提案し、その妥当性を 3 次元モデルによる動的解析の結果と比較することで検討した。その結果、以下の結論を得た。

- ・上部構造物の効果について、並進方向成分は、高振動数になるほど上部構造物の長さ c に対して、地動の波長が短くなることで、入力損失効果が大きくなる。また、上部構造物の長さ c に対して地動の見かけの波長 λ が c の正の整数倍となる場合に最も入力損失効果が大きくなる。
- ・回転方向成分は、地動の見かけ波長 λ が上部構造物の長さ c に対して $\pi/2$ 倍の場合に $\eta_{\varphi c}$ が最大となる。
- ・並進成分は地動に対して同位相で挙動するのに

対し、回転成分は地動に対して $\pi/2$ 位相がずれた挙動となる。このため、並進挙動が最大となる状態において回転挙動は生じておらず、それとは逆に回転挙動が卓越する状態において並進挙動は生じない。

- ・提案手法と動的解析の結果は調和的であり、本手法を用いて構造全体系の入力損失効果を精度よく評価できる。

今後は、構造部材の実剛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) 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 167 号，pp.25-30, 1970.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) Nikolaou, A., Gazetas, G. : Seismic design procedure for kinematically stressed piles, Proc. of 14th int. conf. on soil mech. and found. engrg, pp.253-260, 1997.
- 6) Mylonakis, G., Nikolaou, A., Gazetas, G. : Soil-Pile-Bridge seismic interaction: Kinematic and inertial effects. Part I: Soft soil , Int. J. Earthquake Engrg. and Structural Dynamics, Vol.26, pp.337-359, 1997.
- 7) 實地雄大，室野剛隆：1柱1杭形式のラーメン高架橋における入力損失効果の評価，地盤工学研究発表会，2016.
- 8) Penzien, J., Scheffey, C.F. and Parmelee, R.A. : Sesmic Analysis of Bridges on Long Piles, J.Engrg Mech. Div., ASCE, EM3, pp.223-254, 1964.
- 9) 後藤尚男，亀田弘行：On Eathquake Responce of Bridge Piers On Pile Foundations，土木学会論文集，No.131，pp.7-18, 1966.
- 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) 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.
- 12) 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.