

## 応答変位法を用いた入力損失効果の評価手法の提案

(公財) 鉄道総合技術研究所 正会員 ○實地 雄大

(公財) 鉄道総合技術研究所 正会員 室野 剛隆

### 1. はじめに

杭基礎や大型基礎を有する構造物では、地震時において地盤 - 基礎系の幾何学的相互作用により、入力損失が生じることが知られており<sup>1)</sup>など、耐震設計に損失を考慮することでより合理的な設計が可能となる。入力損失効果は、地盤と構造物を一体でモデル化し動的解析を行うことで自動的に考慮される。一方で、鉄道の設計実務<sup>2)</sup>において標準的な手法である分離型モデルを用いた静的解析法に、入力損失効果を考慮する場合は、その効果を含んだ地震作用（有効入力動）に応じた非線形応答スペクトルを算出すれば良い。しかし、分離型モデルを用いて周辺地盤や基礎の条件から損失効果を評価する実務的な手法が確立されておらず、応答値算定に損失を考慮するのは困難な状況である。そこで、本研究では静的解析法に適用可能な損失効果を評価する手法を提案するとともに、提案手法の適用性について検証した結果を報告する。

### 2. 入力損失効果の評価手法

入力損失効果は、自由地盤における地震応答に対する基礎構造物の地震応答の比である有効入力係数  $\eta$  を算出することで評価することができる。そこで、幾何学的相互作用を自然地盤の振動による地盤と基礎構造物の相互作用と解釈し、固有値解析法と応答変位法を組み合わせることで有効入力係数を評価する手法を提案する。提案手法の詳細な手順を下記および図 1 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：応答変位法を用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：Step2 から算出した構造物の変位量を作用させた自由地盤の変位量で除すことで、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、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く、これより高い振動数領域の有効入力係数は、3 次モードのモード形状を用いて算定した有効入力係数を用いる。また、この手法は、鉄道の耐震設計における静的解析法で使用される応答変位法を用いた手法であり、設計実務への適用性が高い。

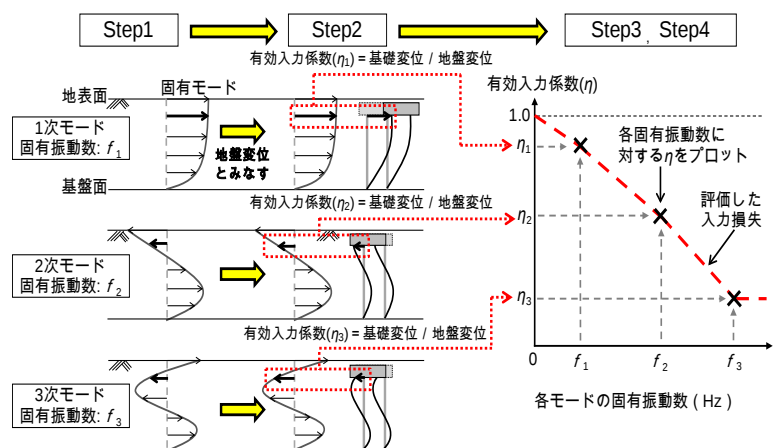


図 1 有効入力係数の算定手法の概要

### 3. 提案手法の検証における解析条件

提案手法の検証は、一体型モデルによる動的解析法と提案手法でそれぞれ得られる有効入力係数を比較することで行う。対象構造物は、図 2 に示す 1 柱 1 杭形式のラーメン高架橋とし、杭基礎は杭頭部が地中梁に剛結され先端

キーワード 入力損失, 有効入力動, 有効入力係数, 応答変位法, 幾何学的相互作用

連絡先 〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38 (公財)鉄道総合技術研究所 地震応答制御 TEL 042-573-7336

が支持された杭径 1m, 杭長 21.0m の鉄筋コンクリート杭を想定した。モデル化は、部材を梁要素, 自由地盤をばね要素でモデル化した鉄道の耐震設計で標準的に用いられる質点系モデルを用いた。モデル化においては、杭基礎等の構造物は慣性の相互作用の影響を排除するため無質量とした。また、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。地盤条件は、図 3 に示す鉄道の耐震設計における、G3 地盤（普通地盤）相当の多層地盤と G4 地盤（普通～軟弱地盤）相当の一層地盤の 2 種類の地盤を想定した。さらに、入力地震動は、ホワイトノイズを使用して自由地盤の底面から入力した。

#### 4. 提案手法の適用性の検証

G3 地盤（多層）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の変位を図 4 に示す。同図では、振動数が高くなる高次モードほど、自由地盤の変位に対して構造物の変位が追従しなくなっている。入力損失は振動数が高くなるほど杭長に対して波長が相対的に短くなり、その結果、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ることが明らかとなっており<sup>3)</sup>、図 4 の本手法を用いた結果はその特徴がよく表現できている。また、図 4 では、自由地盤において地表面付近の振幅が急激に変化している。これは、地表面付近の粘性土層において  $V_{s0}$  が変化していることに起因している。

次に、動的解析法および提案手法から得られた杭頭位置における自由地盤の変位に対する構造物の変位の比から算出した有効入力係数の比較を図 5 に示す。地盤条件が入力損失効果に与える影響を比較すると、地表面付近の地盤が軟らかい G3 地盤では、G4 地盤に比べ有効入力係数が低振動数領域において低減しており入力損失効果大きい。入力損失は、杭剛性に対して地盤剛性が相対的に小さいほど（地盤が軟らかいほど）大きくなる特徴があり<sup>3)</sup>、図 5 の結果はその特徴と一致する。また、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された。

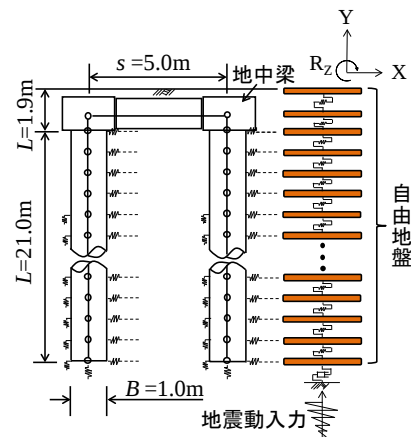


図 2 解析モデル図

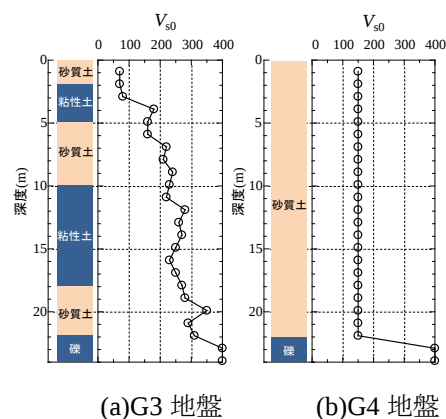
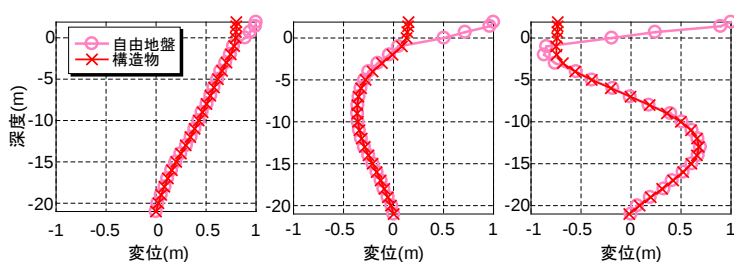
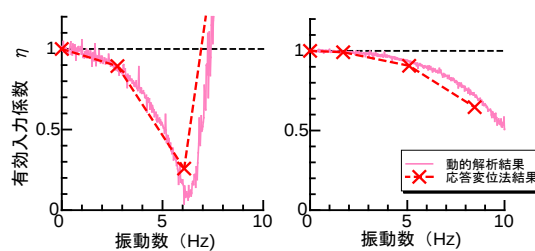


図 3 柱状図



(a)1 次モード (b)2 次モード (c)3 次モード

図 4 応答変位法による地盤変位分布と基礎の応答



(a)G3 地盤 (b)G4 地盤

図 5 動的解析法と提案手法の比較

#### 5. おわりに

本研究では、応答変位法を用いた入力損失効果の評価手法を提案した。また、提案手法と動的解析を比較することで提案手法の適用性を検証し、本手法を用いて精度良く入力損失効果を評価できることを確認した。これにより、簡易に入力損失効果を評価でき、静的解析法による合理的な耐震設計が可能となる。

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/I-63, 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) 室野剛隆, 坂井公俊：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, 鉄道総研報告, 第 26 巻, 第 11 号, pp5-10, 2012.