

|       |
|-------|
| 鉄道一般  |
| 車両    |
| 施設    |
| 電気    |
| 運転・輸送 |
| 防災    |
| 環境    |
| 人間科学  |
| 浮上式鉄道 |

# 構造物基礎の影響を受ける地盤の揺れを捉える

構造物基礎がある地盤では、基礎があることによる影響を受けるため、基礎のない自由地盤に比べて地震動が低減される「入力損失」という効果が生じます。この入力損失を構造物の耐震設計に考慮することができれば、実現象に即した構造物の設計を行うことが可能となります。ここでは、耐震設計において主流となっている静的解析法において、基礎構造における入力損失を定量的に評価する手法を紹介し、さらには、本評価手法を用いた地震作用の低減事例について紹介します。



**山田 聖治**  
Seiji Yamada  
鉄道地震工学研究センター  
地震応答制御研究室  
上席研究員  
【専門分野】 建築構造、  
地震工学



**室野 剛隆**  
Yoshitaka Murono  
鉄道地震工学研究センター  
研究センター長  
【専門分野】 地震工学



**寶地 雄大**  
Yudai Hochi  
前 鉄道地震工学研究センター  
地震応答制御研究室  
研究員  
【専門分野】 地震工学

## はじめに

構造物基礎がある地盤では、基礎があることによる影響を受けるため、基礎のない自由地盤に比べて地震動が低減される「入力損失」という効果が生じます。

入力損失は、動的相互作用(☞参照)の一つです。地盤中に硬さ(剛性)を持つ基礎があることで、基礎がその周辺地盤の挙動を拘束するように挙動するため、構造物に入る地震動が、基礎のない自由地盤における地震動より小さくなります。したがって、この入力損失を構造物の耐震設計に考慮することができれば、実現象に即した構造物の設計を行うことが可能となります。

ここでは、この入力損失のメカニズムについて説明するとともに、杭基礎

構造を対象として設計実務で入力損失を考慮する手法<sup>1)</sup>について紹介します。

## 入力損失の概念とメカニズム例

入力損失の概念を、図1に示します。構造物のない自由地盤は、地震時にある地盤変形を生じます。一方、剛性の高い基礎がある地盤では、基礎周辺の地盤の変形は、基礎自体の変形と同等になり、地盤変形が小さくなります。厳密には、基礎の変形とその周辺地盤の変形は必ずしも同一にはなりません、その場合であっても、基礎の拘束効果で地盤の変形が小さくなります。その効果は、地盤に対する基礎の相対的な剛性が大きくなる場合に発現し、地盤が柔らかいほど、杭径が大きいほど、杭長が短いほど、杭本数が

### ☞ 動的相互作用

地震が発生し、構造物が揺れている時、地盤と構造物が相互に影響し合う現象で、「慣性の相互作用」と「幾何学的相互作用」に分類されます。

「慣性の相互作用」は、質量をもった構造物が揺れることで抵抗となる地盤との間に発生する現象で、構造物がもつ振動エネルギーの一部が地盤に放出される「逸散減衰」が該当します。

「幾何学的相互作用」は、質量のない基礎があった場合でも、地盤が振動・変形することで基礎の剛性との間に発生する現象で、ここで説明する「入力損失」が該当します。

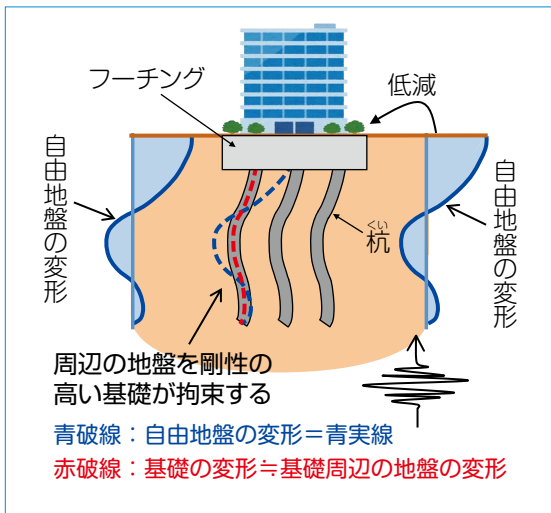


図1 入力損失の概念

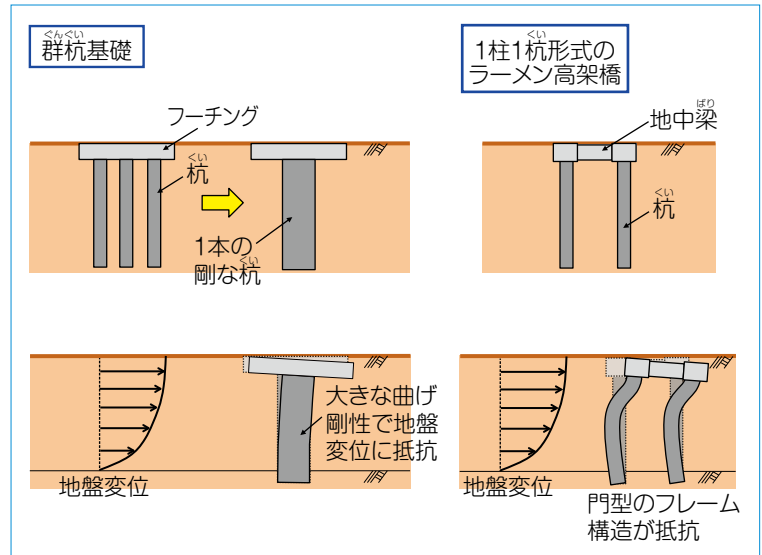


図2 入力損失の発生メカニズム

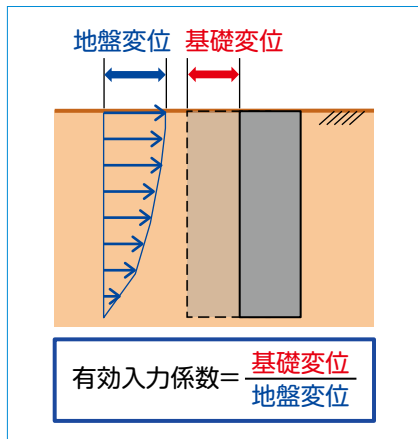


図3 入力損失の評価

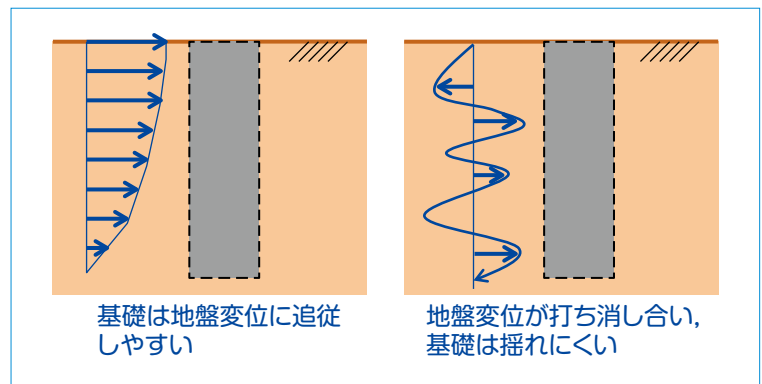


図4 地盤変位の揺れ方と入力損失

多いほど、効果が顕著になることがわかっていきます。

実構造物を例にした入力損失の発生メカニズムを図2に示します。群杭基礎では、複数の杭が組み合わせられることで、基礎としては、非常に剛性の高い1本の基礎とみなすことができます。そのため、大きな曲げ剛性で地盤変位に抵抗することになり、図1で示した入力損失の効果が発生します。また、1柱1杭形式のラーメン高架橋の場合、杭の曲げ剛性は群杭基礎に比べて大きくはありませんが、地中梁でつながれ

た門型のフレーム構造として抵抗できるため、地盤変位への追従が小さくなり、入力損失の効果が発生します。

### 入力損失評価における課題

入力損失による効果は、図3に示す自由地盤の変位(地盤変位)に対する基礎の応答変位(基礎変位)の比を算定することで評価できます。この比を有効入力係数(☞参照)とよび、 $\eta$ で表現します。

ただし、実際の地震では、自由地盤は必ずしも図3のような形状だけで揺れているわけではなく、地盤の条件に

応じた複雑な形状で、時々刻々と変化しながら揺れています。

また、地盤変位の形状の違いによって、入力損失の効果は異なることがわかっています。図4に、地盤変位の深さ方向の山が一つしかない場合(左図)と複数ある場合(右図)を示します。図4左では、基礎は地盤変位に追従しやすいため、有効入力係数は大きく(=入力損失は小さく)なりますが、図4右では、基礎は地盤変位に追従しにくいいため、有効入力係数は小さく(=入力損失は大きく)なります。

つまり、入力損失を正確に評価するためには、地盤変位の深さ方向分布と時間的変化を考慮しなければならないことがわかります。

#### ☞ 入力損失と有効入力係数

有効入力係数 $\eta$ を1から引いた「 $1 - \eta$ 」が実際の入力損失に相当し、自由地盤の地震動に対して、構造物に入る地震動の低減倍率を表しています。

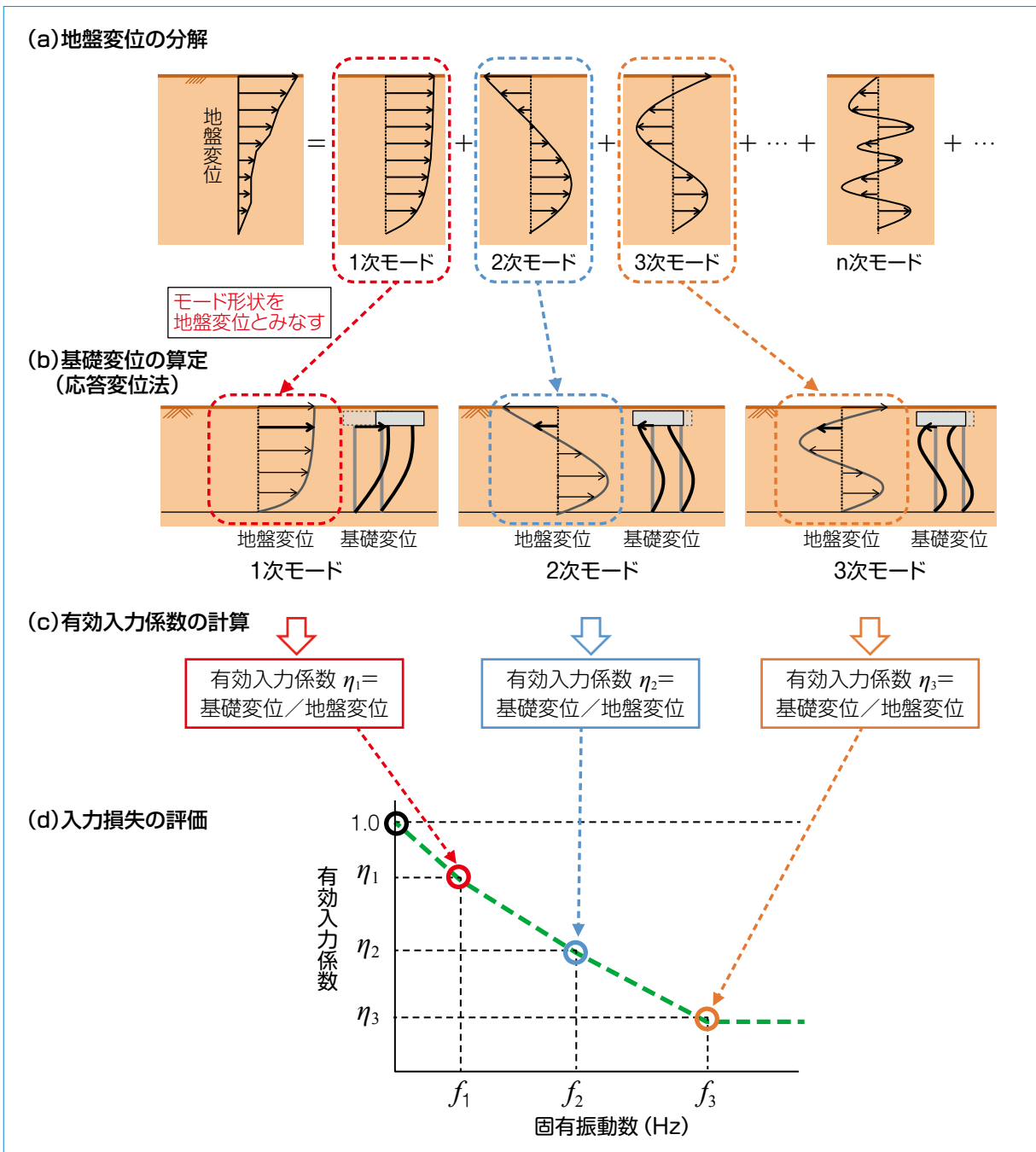


図5 設計実務に有用な入力損失の簡便な評価手法

### 設計実務における入力損失評価

鉄道構造物の耐震設計における入力損失の考慮について説明します。

鉄道構造物の耐震設計標準<sup>2)</sup>で推奨している動的解析では、自由地盤や構造物を含む一体型のモデル化を用い、地震動の時刻歴波形を動的に作用させています。実際の地盤変位や基礎変位など、複雑な地震時挙動を精緻に表現

できるため、入力損失の効果を自動的に反映することが可能です。

一方、設計実務においては、自由地盤や構造物を一体としない分離型モデルを用い静的解析を用いることがしばしば行われています。静的解析法は、本来動的に働く地震作用を静的な荷重に置き換えて、あらかじめ与えられた設計応答スペクトルから構造物の応答

値を算定する手法です。一般的な鉄道構造物への適用性が高く、かつ簡易に応答値を算定できる特徴を有しています。しかし、この静的解析法では、入力損失の動的な現象を合理的に評価する手法がこれまでにはなく、設計実務においては、入力損失の効果は考慮されていないのが実情でした。

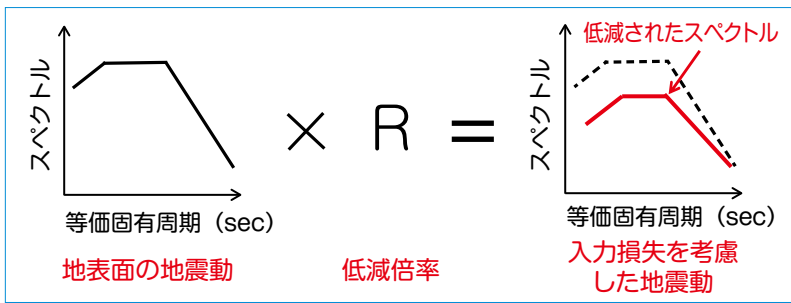


図6 地震応答スペクトルの補正手法

### 入力損失の簡便な評価手法

以上のような背景から、設計実務への適用性が高く、簡便な入力損失の評価手法の確立が望まれていました。そこで、自由地盤の揺れを分解し、それぞれの揺れの入力損失を個別に算定することで、実地震を想定した入力損失を評価する手法を開発しました。図5にその流れを説明します。

#### (a) 地盤変位の分解

地盤や構造物は、材質や形状などに応じた固有の揺れやすさをもっています。これを「固有モード」とよび、揺れやすい方から順に、1次モード、2次モード、……と複数存在しています。そして、この固有モードはそれぞれ揺れ方(形状)と揺れる速さ(振動数)をもっており、ある重みづけをした固有モード形状を足し合わせることで、元の地盤や構造物の揺れを表現できることがわかっています。

図5(a)では、この性質を用いて、自由地盤の地盤変位を複数の固有モード形状に分解しています。なお、地盤変位の場合、主な揺れの範囲が3次モードぐらいまでのため、1~3次モードを考慮すれば十分です。

#### (b) 基礎変位の算定(応答変位法)

(a)で得られたモード形状を地盤変位とみなし、応答変位法(☞参照)によって基礎変位を求めます。

#### (c) 有効入力係数の計算

固有モードごとに、図3の考え方で有効入力係数を計算します。なお、こ

の時の地盤変位は、基礎変位と同じ深さの値を用います。

#### (d) 入力損失の評価

得られた固有モードごとの有効入力係数( $\eta$ )と固有振動数( $f$ )を図にプロットするとともに、固有振動数ゼロでは入力損失がない( $\eta=1$ )として、プロットの間を線形補間することで入力損失を評価します。なお、3次モード以降については、若干の凹凸はあるものの平均的にみればフラットで扱えます。

### 提案手法の適用事例

最後に、提案手法の適用方法と事例を紹介します。

適用方法の詳細は文献1)に示しますが、有効入力係数を用い、構造物の等価固有周期に応じた地震応答スペクトルの低減倍率Rを算出することで、入力損失を考慮した地震応答スペクトルを求めるものです。そのイメージを図6に示します。

次に、短周期で入力損失が大きいとされる2011年東北地方太平洋沖地震の築館における記録を対象に、提案手法および動的解析法で入力損失を考慮した場合と、入力損失を考慮しない場合の応答スペクトルを図7に示します。

#### ☞ 応答変位法

地盤の相対変位に応じた構造物の変形を静的に作用させ、構造物の応力を求める方法です。

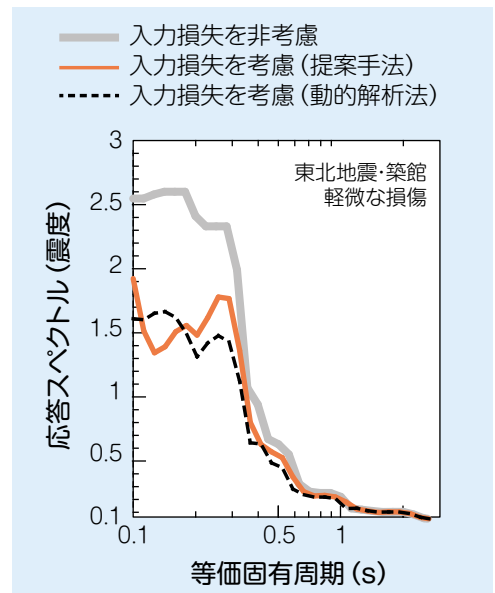


図7 東北地方太平洋沖地震を用いた比較

提案手法の結果は動的解析法と同等で、入力損失効果を適切に評価できていることから、評価手法として妥当性が高いことがわかります。

### おわりに

構造物基礎の影響を受ける地盤において、自由地盤に比べて地震動が低減する入力損失について、簡便かつ実用的な評価手法を紹介しました。本手法は、鉄道構造物の設計プログラムにも導入済みとなっており、今後活用されることを期待しています。

なお、適用事例には、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ています。深く感謝の意を表します。[RRR]

### 文献

- 1) 寶地雄大, 土井達也, 室野剛隆: 耐震設計の静的解析における入力損失効果の評価手法, 鉄道総研報告, Vol.31, No.7, pp.35-40, 2017
- 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