

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

# 振動計測により建設地点の揺れやすさを評価する

平成24年に改訂された鉄道構造物等耐震設計標準・同解説 耐震設計では、鉄道構造物の設計に用いる設計地震動の算定において、建設地点の深い地盤構造による揺れやすさ（設計サイト増幅特性）を把握する必要があることが記述されています。これを受け、近年では設計サイト増幅特性の評価を行うにあたって、直接建設地点の振動計測を実施し、その結果を活用する事例が増えてきています。そこでここでは、振動計測を用いた評価の方法や実際の評価事例について紹介します。



**神澤 拓**  
Taku Kanzawa  
鉄道地震工学研究センター  
地震動力学研究室  
研究員  
[専門分野] 地震工学



**田中 浩平**  
Kohei Tanaka  
鉄道地震工学研究センター  
地震動力学研究室  
副主任研究員  
[専門分野] 地震ハザード・リスク評価, 地震工学



**坂井 公俊**  
Kimitoshi Sakai  
鉄道地震工学研究センター  
地震応答制御研究室  
主任研究員  
[専門分野] 地震工学



**小島 謙一**  
Kenichi Kojima  
鉄道地震工学研究センター  
地震動力学研究室  
室長  
[専門分野] 地盤工学

## はじめに

鉄道構造物直下の地盤は、その地盤構造に応じて、地震時の揺れやすさが異なります。構造物の新設や既設構造物の耐震補強を行う際には、建設地点固有の地盤構造を考慮した合理的な設計地震動を算定するために、地盤の揺れやすさを把握することが重要です。この地盤の揺れやすさは、L2地震動とよばれる「建設地点で考えられる最大級の強さをもつ地震動」を算定する上で、重要な指標となります。

ここでは、現在の鉄道構造物の設計に用いられている鉄道構造物等耐震設計標準・同解説 耐震設計<sup>1)</sup>(以下、耐震標準)におけるL2地震動と地盤の揺れやすさの関係と、その揺れやすさを実際の振動計測データを用いて評価する方法について紹介します。

### ☞ モーメントマグニチュード (Mw)

地震の発生源となる岩盤のすれの規模(すれの面積×すれの量×岩盤の硬さ)から計算される地震の規模を表す指標です。なお、2011年に発生した東北地方太平洋沖地震は、観測史上最大のモーメントマグニチュード9.0でした。

## L2地震動の算定方法

耐震標準に基づくL2地震動を算定するためには、建設地点毎に、建設地点周辺にある大きな震源域(震源特性)と、建設地点の地盤構造による揺れやすさ(地点特性)、といったその地点固有の特徴を適切に考慮する必要があります。

ただし、以下の2つの条件いずれにも該当しない場合には、L2地震動の算定において詳細な検討は不要と判断することができ、簡易な手法によりL2地震動を算定することができます。

**条件①:** モーメントマグニチュード  $M_w$  (☞参照) = 7.0よりも大きな震源域が建設地点の近くで確認される場合

**条件②:** 耐震設計上の基盤面(後述)より深い地盤構造の影響によって地震動の著しい増幅が想定される場合

条件①は前述の“震源特性”に対応します。これを確認するには、過去の被害地震や活断層調査結果をまとめた資料や地震カタログなどを利用することが有効です。参考となる資料は耐震標準にもその一部が示されています。

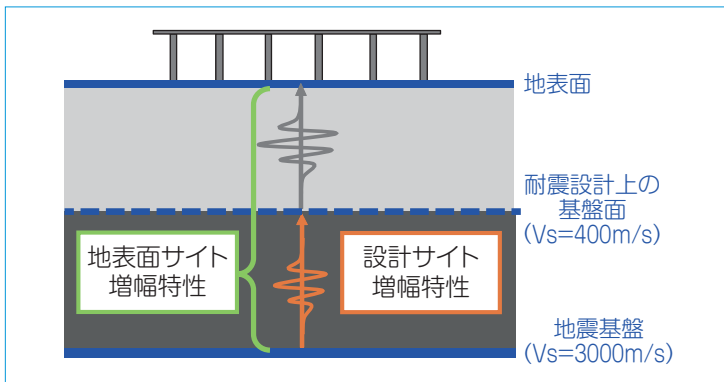


図1 設計サイト増幅特性の定義

条件②は前述の“地点特性”に該当します。「耐震設計上の基盤面」とは、せん断波速度 ( $V_s$ ) とよばれる、地震動の伝わる速さが400m/s程度となる地層です。この「耐震設計上の基盤面」より深い地盤構造による地盤の揺れやすさを「設計サイト増幅特性」とよびます。図1にそれぞれの位置関係を示します。また、「設計サイト増幅特性」を評価する過程で必要となる地震基盤（地震の発生源となる岩盤で  $V_s = 3000\text{m/s}$ 程度）から地表面位置までの揺れやすさを、「地表面サイト増幅特性」とよんでいます。

以上のように定義される設計サイト増幅特性を評価するためには、建設地点で振動計測を行うことが有効です。計測は、常時微動観測と地震観測の2種類があります。常時微動とは、常に発生している地盤の小さな振動のことで、建設地点でコンパクトな機器を用いて計測することができ、30分程度の短時間で計測が可能です（図2(a)）。しかし、常時微動で評価される振動特性は、一定レベルの評価は可能であるものの、設計サイト増幅特性との関係性が十分に解明されているとはいえないため、地震観測に比べると信頼性がやや劣ります。一方で地震観測は、その地点の地震時の増幅特性を直接含んだデータを取得できるため、信頼性が高いデータが得られます。しかしこ

ちらは、観測に要する期間が長く、観測機材も大掛かりであったため、鉄道現場では適用事例がそれほど多くありませんでした。近年、図2(b)に示すような可搬型の小型機材で、地点によっては数か月程度の観測で記録が取得できるようになったことから、実施事例が増えてきています。そこで、ここでは振動計測のうち地震観測により設計サイト増幅特性を評価する方法について紹介します。

### 設計サイト増幅特性を評価する方法

地震記録を使って設計サイト増幅特性を評価するには、建設地点を含む複数の地震観測点で同時に計測した多数の地震記録に対して、統計的な解析手法を用いることが一般的です。しかしこの方法は、多くの地震記録が必要になるがゆえに地震観測に長期間を要することや、複雑な数値解析を要するためには評価が煩雑になってしまうことがあります。

そこで、耐震標準では、実務において活用することに配慮して、より簡易に設計サイト増幅特性を評価する手法が示されています。具体的には、地表面サイト増幅特性がすでに評価されて



(a)常時微動観測状況



(b)地震観測状況(可搬型)

図2 振動計測の状況

いる<sup>2)</sup>公的観測点 (K-NET (図13ページ参照)) を基準点として、地震観測結果を活用して地表面サイト増幅特性を簡易に補正し、建設地点の設計サイト増幅特性を評価するものです。評価手順は以下の通りです（図3）。

- ①建設地点と基準K-NET観測点において同じ地震で観測された地震記録ペアを整理します。
- ②すべての地震記録に対してフーリエスペクトル (図14参照) を算定し、ペアごとにフーリエスペクトルの比(建設地点/基準K-NET観測点)を算定します。
- ③このスペクトル比は震源位置と建設地点までの距離の違いを考慮する必要があるため、距離の逆数を用いて比率の補正を行います。
- ④①～③の作業をすべての地震ペア

#### フーリエスペクトル

地震波をさまざまな周期の振動の集まりととらえ、周期ごとの地震波の強さに分解して表したものです。

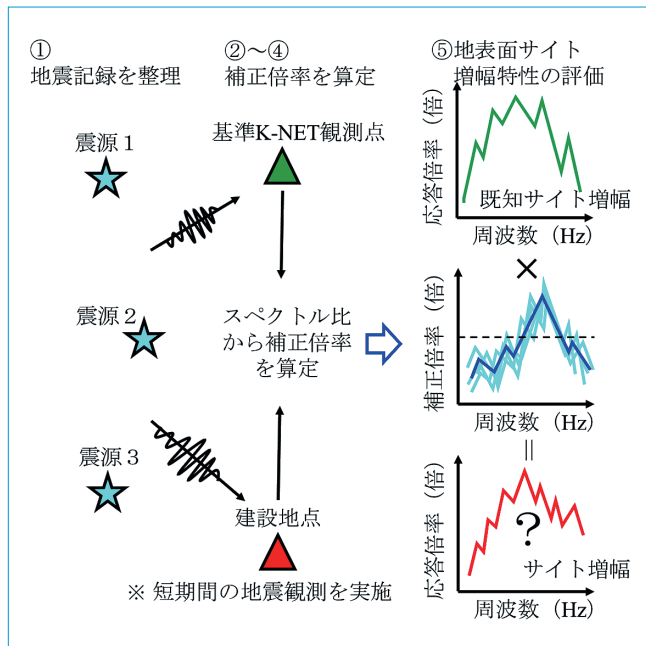


図3 地表面サイト増幅特性の算定手順 (図内丸数字は文章中の算定順序に対応)

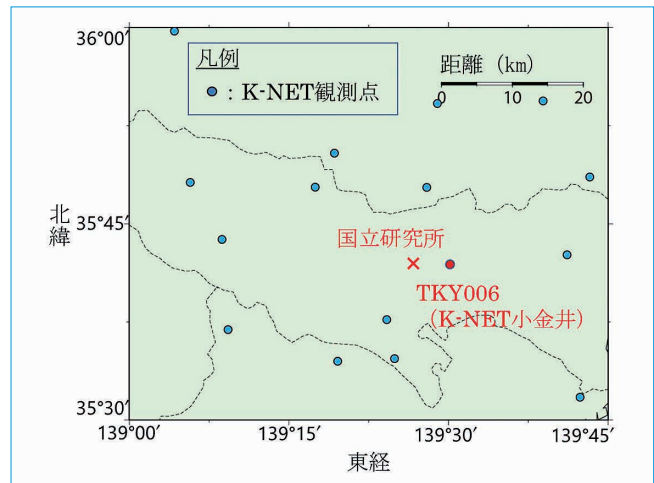


図5 評価地点周辺のK-NET観測点

表1 地震の発生日, 震源位置, 規模の整理

No.	発震日	時刻	北緯	東経	M
1	2011/4/19	2:37	35.553	139.667	4.2
2	2011/8/17	9:23	36.035	139.793	4.3
3	2012/1/28	7:39	35.492	138.978	4.9
4	2012/1/28	7:43	35.488	138.977	5.4
5	2012/1/29	16:46	35.537	138.983	4.7
6	2012/3/16	4:20	35.880	139.590	5.3

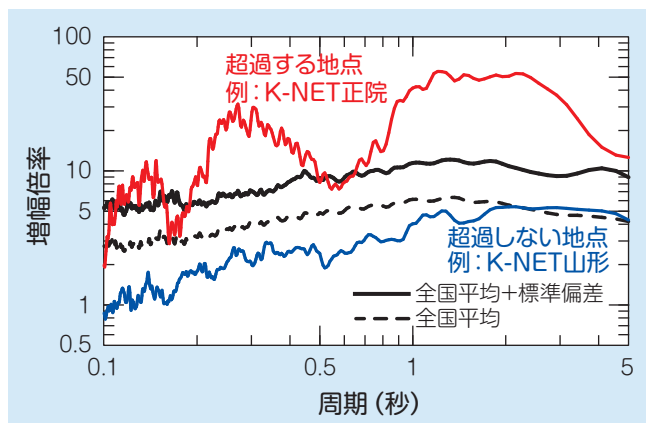


図4 全国的设计サイト増幅特性との比較図

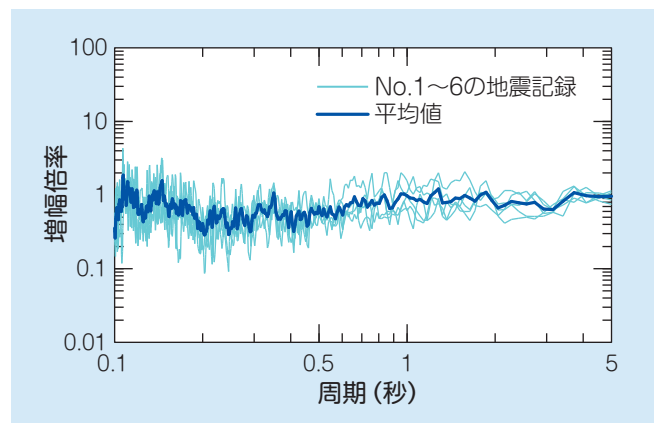


図6 フーリエスペクトルの比(スペクトル比)

に対して行い、全結果を平均したものが2観測点の補正倍率となります。

⑤この補正倍率を基準K-NET観測点の地表面サイト増幅特性に乗じることによって、評価地点の地表面サイト増幅特性を算定します。さらにここで評価された地表面サイト増幅特性に対して、表層地盤のボーリング情報などから表層地盤の増幅特性を除去することで、設計サイト増幅特性を評価することができます。

この設計サイト増幅特性を、図4に示すように全国各地で評価された設計サイト増幅特性の平均+標準偏差(黒線)の値と比較することで、詳細な検討が必要な建設地点であるかどうかを相対的に判断することができます。例えば、幅広い周期帯で大幅に超過する建設地点(赤線)は条件②に該当する地点と判断することができます。

### 設計サイト増幅特性の評価例

ここでは、実際に鉄道総研国立研究

所を例として、設計サイト増幅特性を先ほど紹介した方法で評価した事例を紹介します。

国立研究所付近のK-NET観測点は図5のとおりです。周辺にはいくつかの公的観測点がありますが、もっとも距離が近いTKY006(K-NET小金井)を基準として評価しました。

### (1) 評価に用いる地震観測記録

設計サイト増幅特性の評価に必要な地震記録は、鉄道総研内に設置された地震計で取得された記録を使用しまし

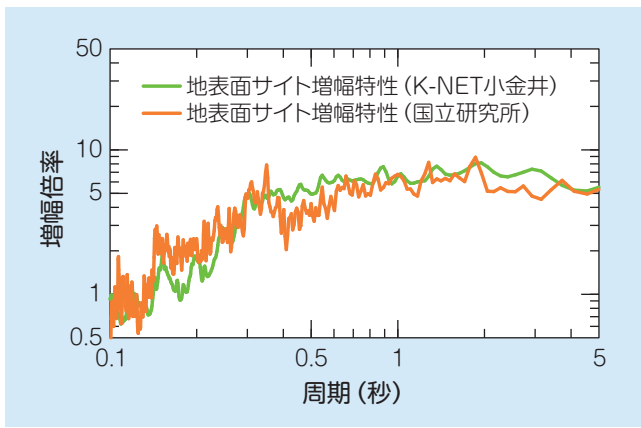


図7 鉄道総研における地表面サイト増幅特性

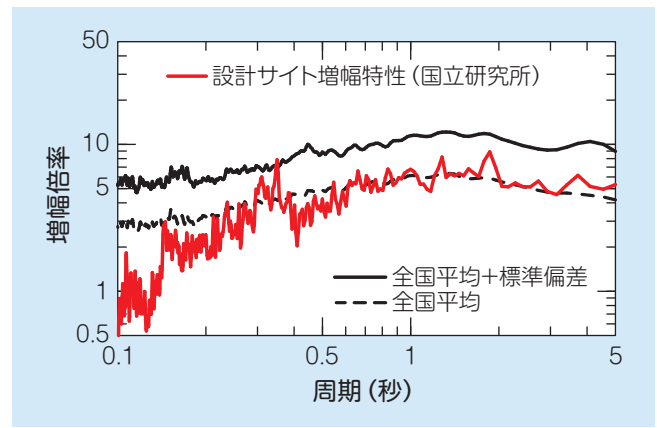


図8 鉄道総研がある地点の設計サイト増幅特性(赤)

た。一方、基準点となるK-NET小金井の地震記録は、Web上に公開されている記録<sup>3)</sup>を使用しました。

ここでは、2011年3月から2012年7月までの間に両地震計で記録された地震記録のうち、K-NET小金井で最大加速度5gal以上の地震が記録された6つの地震記録ペア(表1)を用いて補正倍率を算定しました。

## (2) 補正倍率の算定

すべての地震記録に対してフーリエスペクトルを算定し、地震記録ペアごとにスペクトル比(鉄道総研/K-NET小金井)を算定します。次に、各震源の距離の違いを考慮して比率の補正を行うと図6に示す波形群(水色)が求まります。また、すべての地震におけるスペクトル比の平均値(青線)が2観測点の補正倍率です。これをみると、補正倍率はおおむねすべての周期帯において1.0付近であることがわかります。これは、鉄道総研とK-NET小金井の揺れやすさが近いことを表します。

## (3) 設計サイト増幅特性の評価

国立研究所における設計サイト増幅特性を評価します。まず、図6の補正倍率を、K-NET小金井の地表面サイト増幅特性に掛け合わせて鉄道総研周辺の地表面サイト増幅特性を求めます(図7)。続いて、表層地盤の増幅特性を算定してその影響を除去しますが、

ボーリング調査結果から鉄道総研周辺は非常に浅い位置に耐震設計上の基盤面があることがわかりました。このような場合は、表層地盤の増幅の影響は非常に小さいと考えられるため、地表面サイト増幅特性をそのまま設計サイト増幅特性として評価することとしました(図8)。

国立研究所の設計サイト増幅特性と全国平均値の結果とみると、国立研究所の設計サイト増幅特性は低周期帯ほど増幅倍率が小さくなっており、また、ほぼすべての周期帯において設計サイト増幅の全国平均値と同等か、それよりも小さい値になっていることがわかります。つまり、国立研究所の設計サイト増幅特性は大きくないと判断することができ、地点特性の観点でL2地震動の算定について詳細な検討は必要ないといえます。

## おわりに

ここでは、構造物の耐震設計に用いるL2地震動の算定において、設計サイト増幅特性を振動計測(地震観測)記録から評価する方法を紹介しました。

このように、近年では設計実務において複雑な数値解析手法によることなく、振動計測による設計サイト増幅特性の評価に基づいてL2地震動を算定し、耐震設計を行う事例が増えてきて

います<sup>4)</sup>。現在は、これまでと比べて一回り小さい規模の地震を対象とした評価法について研究を進めており、観測期間を短縮する試みを検討しています<sup>6)</sup>。今後も、振動計測機器の改良や新たな評価法の開発を推進し、より簡便に設計サイト増幅特性を評価する方法を検討していく予定です。

本検討では防災科学技術研究所の強震観測網K-NETの観測記録を使用させていただきました。記して謝意を表します。RRR

## 文献

- 1) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計，丸善出版，2012
- 2) 岩田知孝，入倉孝次郎：観測された地震波から震源特性・伝播経路特性及び観測点近傍の地盤特性を分離する試み，地震 第2輯，Vol.39，No.4，pp.579-593，1986
- 3) 防災科学技術研究所：強震観測網(K-NET,KiK-net)，<http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/>，(入手日：2019/10/31)
- 4) 朝長光，西恭彦，青柳広樹，神澤拓，坂井公俊：常時微動観測に基づくサイト増幅特性とこれを考慮した設計地震動評価，鉄道工学シンポジウム論文集，Vol.23，pp.155-162，2019
- 5) 田中浩平，坂井公俊：短期間地震動で取得した小地震動記録によるサイト増幅特性の評価，鉄道工学シンポジウム論文集，Vol.23，pp.143-148，2019