

- 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

# 構造物の振動特性を探る

構造物の振動特性は固有振動数（固有周期）と減衰定数に支配されます。固有周期についてはこれまで実測や解析などが多数実施されており、十分な精度で評価可能です。一方、減衰定数については実測例が少なく、発生原因が内部減衰や逸散減衰など複雑な要因を含んでいるため、未解明な点が多い物理量です。構造物の振動特性を把握する手法としては、風、波浪、交通振動などによる地盤の小さな揺れ（常時微動）に対する構造物の応答を観測する常時微動観測があります。ここでは、多数の鉄道構造物で常時微動観測を実施し、固有周期と減衰定数を評価した研究事例を紹介します。

## 構造物の振動特性を評価する重要性

2011年の東北地方太平洋沖地震における新幹線の脱線事故では、共振現象が脱線原因のひとつとして指摘され<sup>1)</sup>、構造物の振動特性の評価の重要性が改めて認識されることとなりました。共振現象は、構造物が固有振動数に近い振動数帯で揺らされると応答が著しく大きくなる現象であり、また、減衰定数が小さいと、その度合いが顕著になります。このように、構造物の振動特性は、固有振動数（☞参照）と減衰定数（☞参照）に支配されます。

固有振動数については、これまで多数の観測事例や評価指標が提案されており、十分な精度で評価ができるようになってきています。一方で、減衰定数は、構造物、地盤の内部減衰や自然地盤への波動逸散（逸散減衰）などが複雑に絡み合って発揮されること（図1）や、実測データが十分ではないことから、未解明な点が多い物理量です。

このように減衰定数に関しては、実測事例が少なく十分な評価方法が確立されていないため、鉄道構造物の現行の耐震設計<sup>2)</sup>においては、一般的と思われる条件での評価にとどまっていま



**和田 一範**  
Kazunori Wada  
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



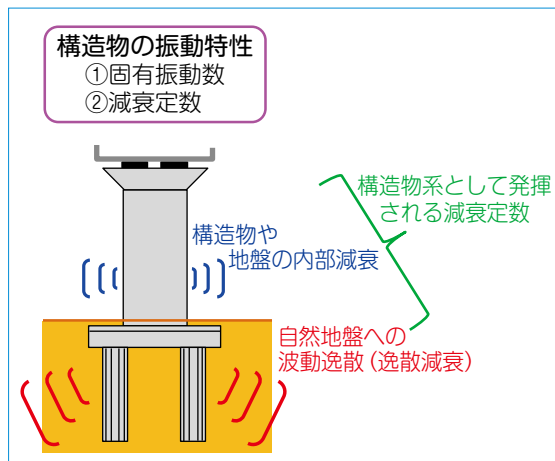
**坂井 公俊**  
Kimitoshi Sakai  
鉄道地震工学研究センター  
地震動力学研究室  
副主任研究員  
[専門分野] 地震工学



**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、  
耐震工学



**豊岡 亮洋**  
Akihiro Toyooka  
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] 耐震設計、  
免震・制震構造



### ☞ 固有振動数

構造物などの振動体が、外部から強制励振を受けずに自由に振動しているときの振動数をいいます。

### ☞ 減衰定数

運動する物体の減衰性状を表す無次元定数のことです。減衰定数が1（臨界減衰）以下の場合、振動現象を示します。たとえば、上部構造物では0.01～0.05程度であることが多いです。

図1 構造物の振動特性および減衰の発生メカニズム

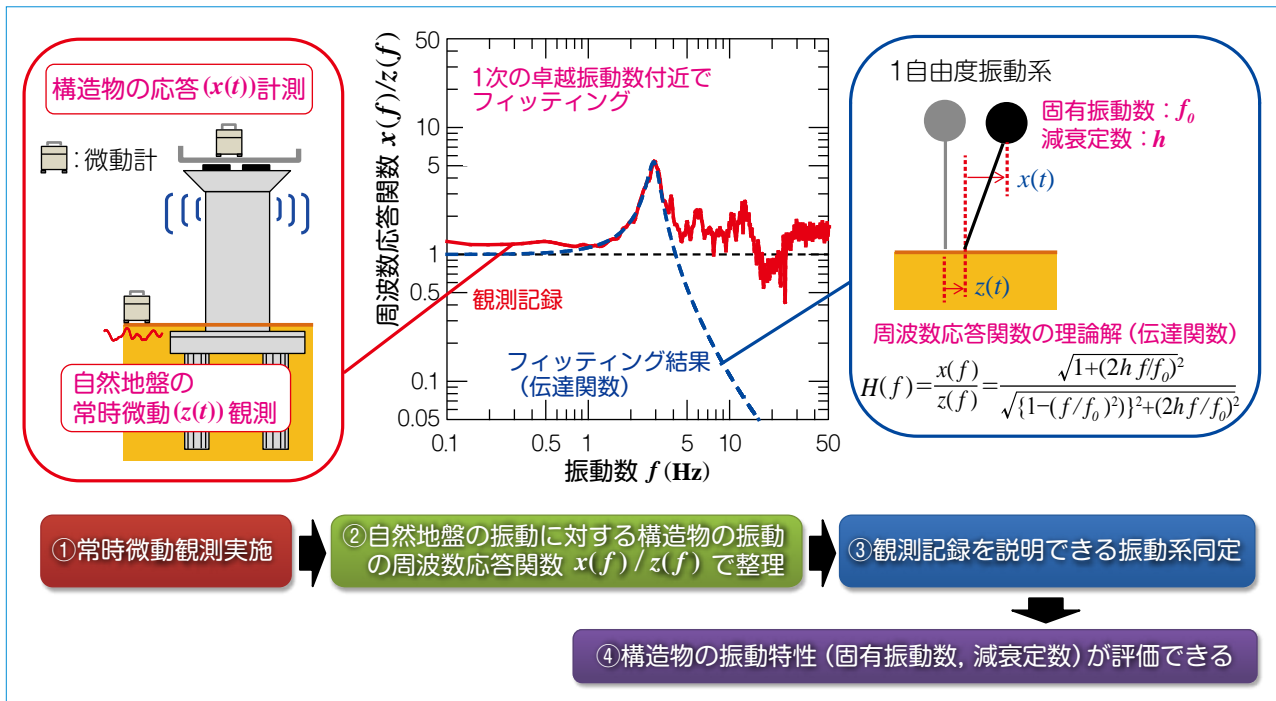


図2 常時微動観測による構造物の振動特性評価の概要

す。しかしながら、先述したような地震時の被害事例を踏まえると、構造物の振動特性、特に減衰定数を適切に評価することがより精度の高い耐震性能評価を行う上では重要となります。

そこで、構造型式や地盤条件の異なる多数の鉄道構造物を対象に、振動特性を把握するためによく用いられる常時微動観測 (☞参照) を実施しました。ここでは、常時微動観測の概要と観測結果を整理することで構造物の減衰定数を評価した事例を紹介します。

### 常時微動観測から構造物の振動特性を評価する方法

常時微動観測による構造物の振動特性評価の概要を図2に示します。まず、構造物の上部と自然地盤 (構造物の振動の影響がない地盤) に高感度の速度計 (微動計) を設置し、ある一定時間の常時微動 (振動) の観測を行います。今回は、200Hzサンプリングで20分間の観測を実施しました。その結果、自然地盤の振動 ( $z(t)$ ) とそれに対する構造物の応答 ( $x(t)$ ) の時刻歴デー

タを取得できます。

次に、観測記録をフーリエ変換 (☞参照) し、自然地盤 ( $z(f)$ ) に対する構造物上部 ( $x(f)$ ) のフーリエ振幅比  $x(f)/z(f)$ 、すなわち自然地盤の振動に対する構造物の振動の周波数応答関数を算定します。このとき、観測記録には、車両通過などに起因する常時微動ではない振動成分が含まれる場合があります。そこで、観測記録を一定時間 (今回は20.48秒) ごとに分割して、常時微動ではない振動成分を含む時間帯は除いた各時間帯での周波数応答関数を算定します。このような手順で算定された各時間帯での周波数応答関数の平均値 (図2のグラフの赤い実線) を観測記録の整理結果とします。

ところで、鉄道構造物の地震時の主要な振動は、周波数応答関数の1次の卓越振動数 (☞参照) で発揮され、その挙動は構造物全体が一体で動く1自由度系のような振る舞いをするのが知られています<sup>3)</sup>。これは、先述の手順で整理した周波数応答関数の1次の卓越振動数付近が、1自由度系の周波

数応答関数の理論解 (伝達関数  $H(f)$ ) で評価できることを意味します。

そこで、観測記録との残差を最小とするように1自由度系の伝達関数をフィッティングさせます (図2のグラフの青い点線)。その結果、構造物の振動特性である減衰定数  $h$ 、固有振動数  $f_0$  を評価することができます。

#### ☞ 常時微動

風や波浪、交通振動などに起因する常に発生している地盤の微弱な振動のことです。

#### ☞ フーリエ変換

任意の関数を三角関数の級数に展開する方法です。地震動などの解析の基本的手法で、特に有限離散データに対するフーリエ変換法のひとつである高速フーリエ変換が広く用いられます。

#### ☞ 卓越振動数

構造物が有するいくつかの振動モードの中で、主要な応答を示す振動数のことです。低次 (1次, 2次など) の固有振動数で応答が卓越することが多いです。

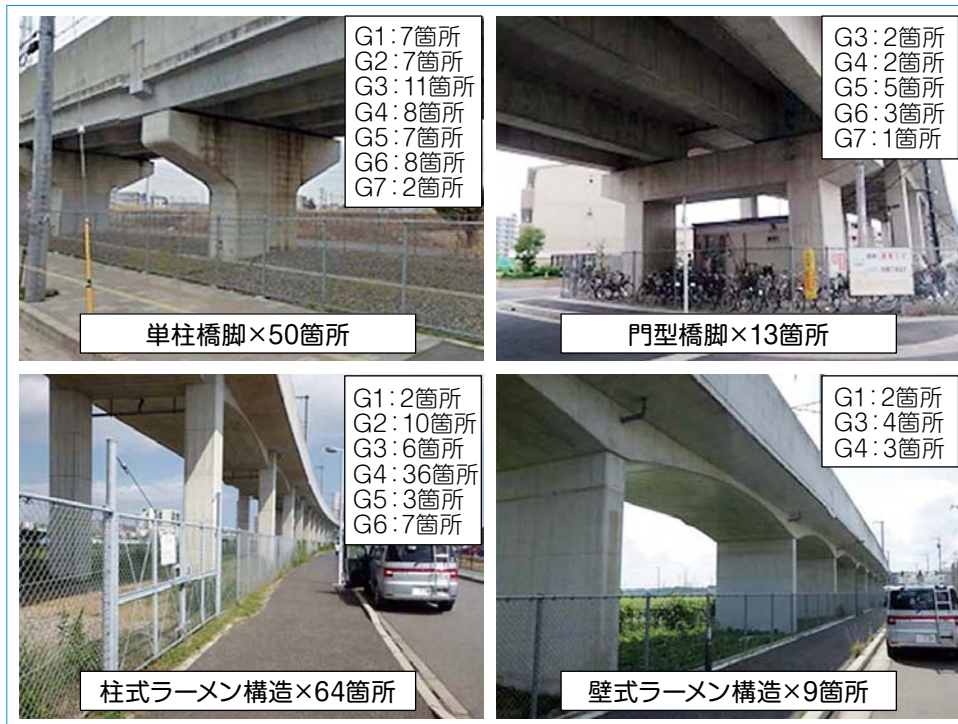


図3 常時微動観測を実施した構造物と地盤種別の概要

### 多数の鉄道構造物での常時微動観測の実施と結果の概略評価

構造型式や地盤条件が多様な計136箇所の鉄道構造物で常時微動観測を実施しました。構造型式は図3に示すように、単柱橋脚、門型橋脚、柱式ラーメン構造、壁式ラーメン構造の4種類、また、地盤条件は耐震設計標準<sup>2)</sup>で定められている地盤種別(☞参照)として、G1地盤からG7地盤までの地盤が良好な箇所から軟弱な箇所まで幅広い地盤条件で観測しました。

観測結果の概略評価の一例として、地盤種別ごとの構造物高さ $H$ と構造物の固有周期 $T_s$ の関係を図4に示します。ここで、固有周期 $T_s$ は固有振動数 $f_0$

の逆数を表します。観測結果の整理から得られるものは固有振動数 $f_0$ ですが、構造物や地盤の評価では、固有周期の方がしばしば用いられるので、以下では固有周期で整理します。

図4より構造物高さと固有周期には正の相関が確認できます。また、地盤種別による明瞭な違いは見られません。なお、構造型式による傾向の違いもありませんでした。この傾向は過去の実測結果の多くで観測されており、背が高い構造物ほど固有周期が長いという物理的な解釈が容易に導き出せます。

次に、構造物の固有周期 $T_s$ と自然地盤の固有周期 $T_g$ との比 $T_s/T_g$ を横軸に取り、地盤種別ごとに減衰定数を整理した結果を図5に示します。この図より $T_s/T_g$ が1より大きい小さいかで傾向が異なることがわかります。具体的には、 $T_s/T_g < 1$ の領域は減衰定数が小さいものから大きいものまで幅広くばらつき、 $T_s/T_g > 1$ の領域は減衰定数が単調減少します。また、これは地盤種別・構造型式によらない傾向です。

続いて、図6に示すように構造物の

上部の変形に対する下部の変形の比(振幅比 $\alpha$ )を定義し、減衰定数 $h$ との関係を示します。ここで、振幅比 $\alpha = 0$ は構造物の上下部の相対変形のみが生じ、地中部分が全く変形しないことを意味し、振幅比 $\alpha = 1$ は構造物の上下部で相対変形が生じず、地中部分の変形のみが生じていることを意味します。すなわち、地盤変形の寄与率に相当するパラメータと言えます。図6より振幅比 $\alpha$ と減衰定数 $h$ は明瞭な正の相関を示すことがわかります。このことから、地盤の変形のしやすさが発揮される減衰定数の大小に関係していることが示唆されます。

### 観測結果から見える構造物の振動特性

観測結果から見える構造物の振動特性として、図5の整理結果をひとつの凡例として整理し、物理的解釈を加えたものを図7に示します。 $T_s/T_g < 1$ の範囲は、地盤が軟らかく、また構造物が硬い範囲ですが、その場合、地盤変形が主体的となり、振幅比 $\alpha$ が大きく

#### ☞ 地盤種別

構造物への地震入力が表層地盤条件の影響を強く受けることから、地盤の固有周期に応じてグループ分けすることが試みられており、これを地盤種別といいます。具体的にはG0地盤(岩盤)、G1地盤(基盤)からG7地盤(極めて軟弱な地盤)までの8種類で区分されます。

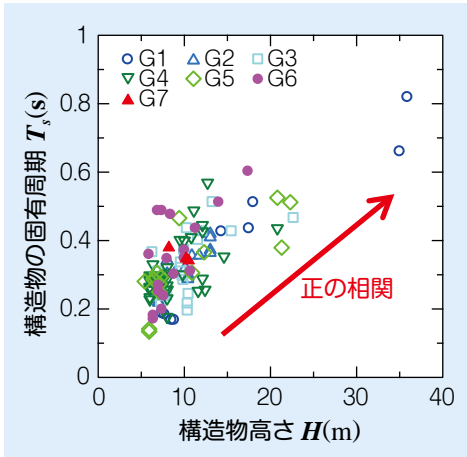


図4 構造物高ささと構造物の固有周期

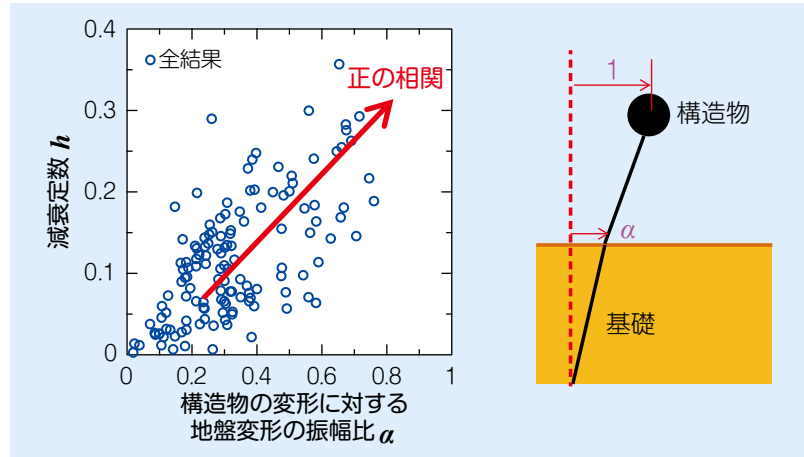


図6 地盤の揺れやすさと発揮される減衰定数

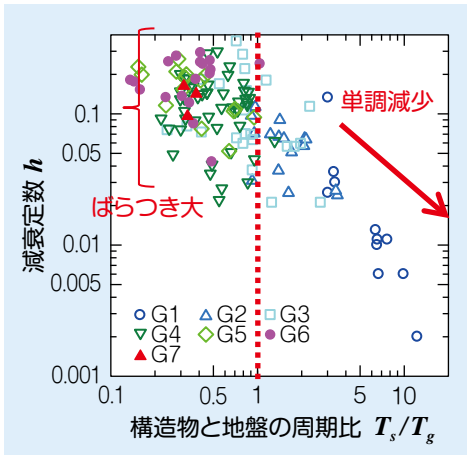


図5 構造物と地盤の周期比と減衰定数

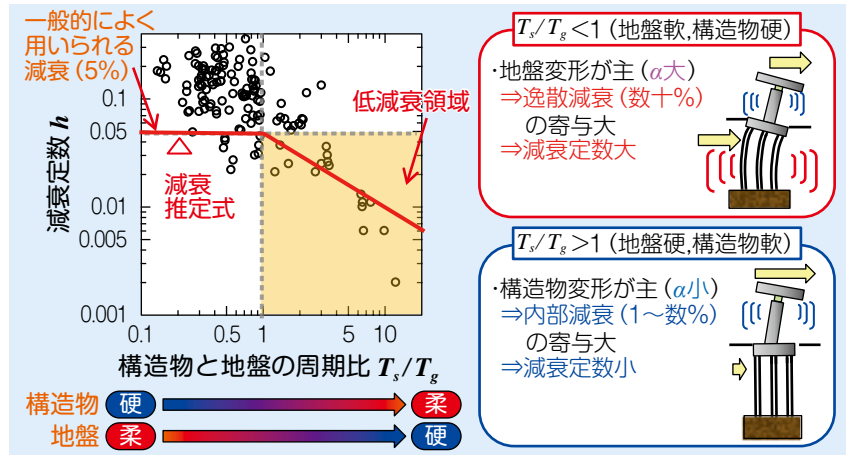


図7 常時微動観測より明らかとなった構造物の振動特性

なるため、地盤の逸散減衰(数十%)が期待できると言えます。一方で、 $T_s/T_g > 1$ の範囲は、地盤が硬く、構造物が柔らかい範囲ですが、構造物の変形が主体的となり、振幅比 $\alpha$ が小さくなるため、構造物の内部減衰のみしか期待できないと解釈できます。

この分析を踏まえ、地盤と構造物の周期比から減衰定数を簡易に推定する式を提案しました(図7のグラフの赤い実線)。本式は、逸散減衰が期待できる $T_s/T_g < 1$ の範囲は、一般的な減衰定数としてよく用いられる5%とし、内部減衰のみしか期待できない $T_s/T_g > 1$ の範囲は、実測結果をおおむね評価するように設定しました。このことから、図中の黄色で示した領域が、減衰定数が一般的な値よりも低くなる可能性が高く、特に注意を要する領域であるこ

とがわかりました。

### おわりに

ここでは、構造物の振動特性である固有振動数、減衰定数を把握する手法として、常時微動観測の概要を紹介しました。また、多数の鉄道構造物において実施した常時微動観測結果を整理することで見えた構造物の減衰定数の評価事例を紹介しました。

ここでは本成果の活用についての紹介を省略しましたが、減衰定数の観点から車両の走行安全性を脅かす可能性のある条件(構造物周期と地盤周期の組み合わせ)を概略評価することが可能なノモグラム<sup>4)</sup>も作成しました。

今後は、構造物の減衰定数の概略評価に本成果を活用するとともに、さらなる観測結果の分析を続け、減衰の発

生要因ごとの個別の評価に取り組みたいと考えています。

なお、本研究は国土交通省の鉄道技術開発費補助金を受けて実施しました。

RRR

### 文献

- 1) 運輸安全委員会：鉄道事故調査報告書、2013
- 2) 国土交通省鉄道局監修、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
- 3) 和田一範、坂井公俊、室野剛隆：実測に基づく鉄道構造物の減衰特性の概略評価、鉄道総研報告、Vol.30、No.5、pp.35-40、2016
- 4) 和田一範、坂井公俊、室野剛隆：鉄道構造物と自然地盤の周期比に基づく減衰定数の簡易推定と車両走行性の概略評価への活用、第71回年次学術講演会、土木学会、2016