

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

不整形な地盤に建設する鉄道構造物の地震時安全性を高める

地震時における鉄道構造物の安全性を高めるためには、建設地点における地盤や構造物の揺れを適切に把握しておくことが重要です。地下の硬い地層が傾斜した「不整形地盤」とよばれる地盤では、地盤の揺れが局所的に大きくなることが知られており、構造物の被害が大きくなることも確認されています。ここでは、不整形地盤上の鉄道構造物の地震時安全性を高めるための取り組みとして、不整形地盤の形状を効率的かつ適切に把握する方法について紹介します。

はじめに

地震に対して安全性の高い構造物の設計を行うためには、建設地点における地表面の揺れの大きさを適切に把握することが重要です。地表面の揺れは、地盤の地層構成に影響を受けるため、この構成を把握する必要があります。

図1 (a) に示すような耐震設計上の基盤面（耐震設計において設定する地下の硬い地層）が傾斜する箇所では、図1 (b) のような地層がほぼ水平に堆積する水平成層地盤と比較して、地表面の揺れが大きくなることが知られています。地震工学の分野では、このような地盤を「不整形地盤」とよび、耐震設計上注意を要する地盤としています。

不整形地盤を伝わる揺れの様子

図2 (a) (b) に、揺れが不整形地盤と水平成層地盤中を伝わる様子を示します。ここでは、図2 (c) に示す揺れが基盤下部（深度40m）から上向き方向に伝わる様子をシミュレーションしています。図2 (a) (b) では、地盤中を伝わる揺れの大きさを、色（赤色や青色）の濃淡で示しています。

まず、図2 (b) に示す水平成層地盤では、揺れが伝わり始めてから0.4秒後に堆積層の下部で水平方向に一樣な赤色の帯が見られます。これは、揺れが堆積層を上向き方向に伝わっていることを示しています。この段階ではまだ、図2 (c) に示した青色の揺れは堆積層に入っていません。次に、0.8秒後の図を見ると赤色と青色の帯が見られ、0.4秒後以降、図2 (c) のすべての揺れが上向きに伝わっていることが確認できます。さらに、1.2秒後の図では、0.8秒後から赤色と青色の帯の位置が入れ替わっており、上向きに伝わる揺れが地表面で反射し、下向き方向に伝播している様子を表しています。このように、反射をくりかえしながら地盤中を伝わる揺れを「実体波」とよびま



杉山 佑樹
Yuki Sugiyama
鉄道地震工学研究センター
地震動力学研究室
研究員



田中 浩平
Kohei Tanaka
前 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



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

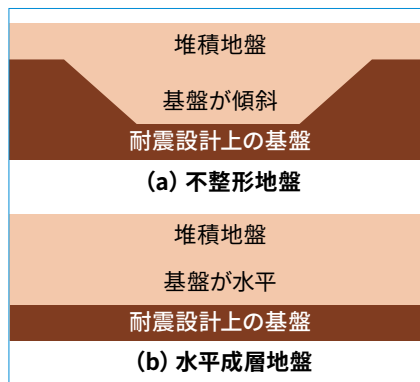


図1 不整形地盤と水平成層地盤

す。図2では、実体波による揺れを赤色と青色の枠で囲って示しています。

図2(a)に示す不整形地盤でも、0.4秒後には水平成層地盤と同様に、実体波が堆積層中を伝わる様子が見て取れます。ただし、地盤左側では基盤が傾斜していることで赤色の帯が斜めに発生し、実体波が斜め上方向に伝わります。次に、0.6秒後には、地盤左側の基盤傾斜部で実体波が斜めに伝わることで、地盤右側の基盤水平部よりも早く地表面で反射し始めます。これ以降の時間では、基盤傾斜の影響によって、実体波が堆積層中を上下方向に複雑に伝わる様子が確認できます(0.8秒後～1.4秒後)。

0.8秒後の不整形地盤では、赤枠と青枠で示す実体波のほかに、水平距離50m～100mの地表面付近で揺れが発生しています。この揺れは、時間経過とともに地表面付近を水平方向に伝わっており、実体波と異なる特徴を有していることから「表面波」とよばれ、不整形地盤では地表面位置の基盤と堆積層の境界部分で発生することが知られています。図2(a)では、表面波による揺れを緑色の枠で囲って示しています。この表面波は、基盤傾斜の角度などにも依存しますが、地表面に沿って基盤水平部まで伝わります。

本シミュレーションでは図2(c)に示す揺れが基盤から伝わることを想定していますが、実際の地震による揺れはさらに複雑で、さまざまな実体波と表面波が発生します。その結果、実体波と表面波が重なり合い、地表面で局所的に大きな揺れが発生することがあります。

不整形地盤上の鉄道構造物の被害事例について

不整形地盤が原因と考えられる地震時の構造物被害が過去に報告されてい

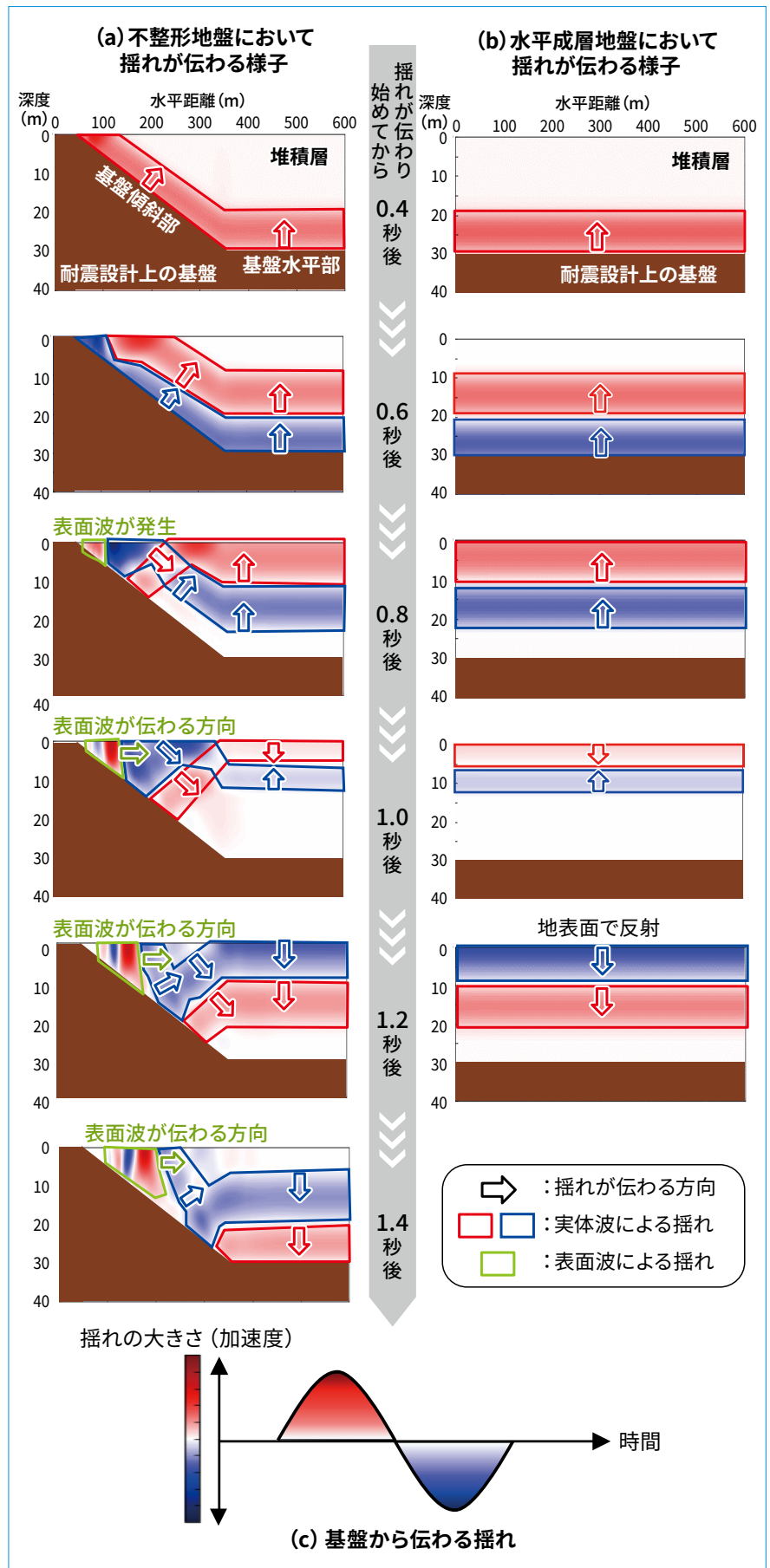


図2 不整形地盤と水平成層地盤を伝わる揺れの様子

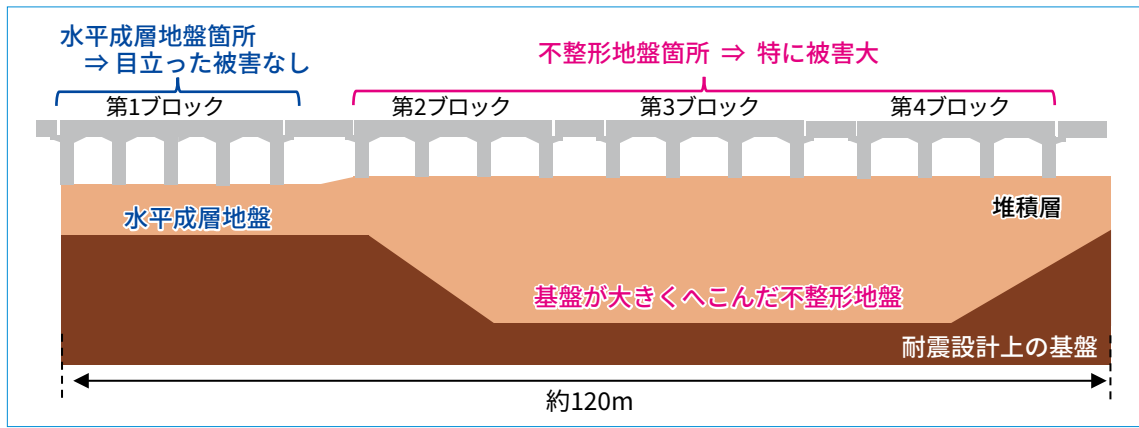


図3 不整形地盤における地震動の局所的な増幅効果による構造物の被害例

ます。例えば、1987年12月に発生した千葉県東方沖地震（マグニチュード6.7）では、図3に示すような、耐震設計上の基礎が大きくへこんだ不整形地盤上の鉄道構造物で、被害が確認されています¹⁾。この地点では、不整形地盤上に位置する第2～4ブロックでとくに大きな被害を受けており、水平成層地盤上に位置する第1ブロックでは、とくに目立った被害がみられませんでした。このようにほぼ同じ場所に位置する構造物であっても、耐震設計上の基礎面の傾斜の影響で被害の大きさは異なる場合があります。

不整形地盤形状の把握方法

これまで鉄道総研では、不整形地盤上に建設する鉄道構造物の地震時安全性を高めるため、地盤や構造物の揺れを算定する方法の整備に取り組んできました²⁾³⁾。ただし、これらの方法を適用する場合、不整形地盤の形状を事前に把握しておく必要があります。そこで、不整形地盤の形状を効率的かつ

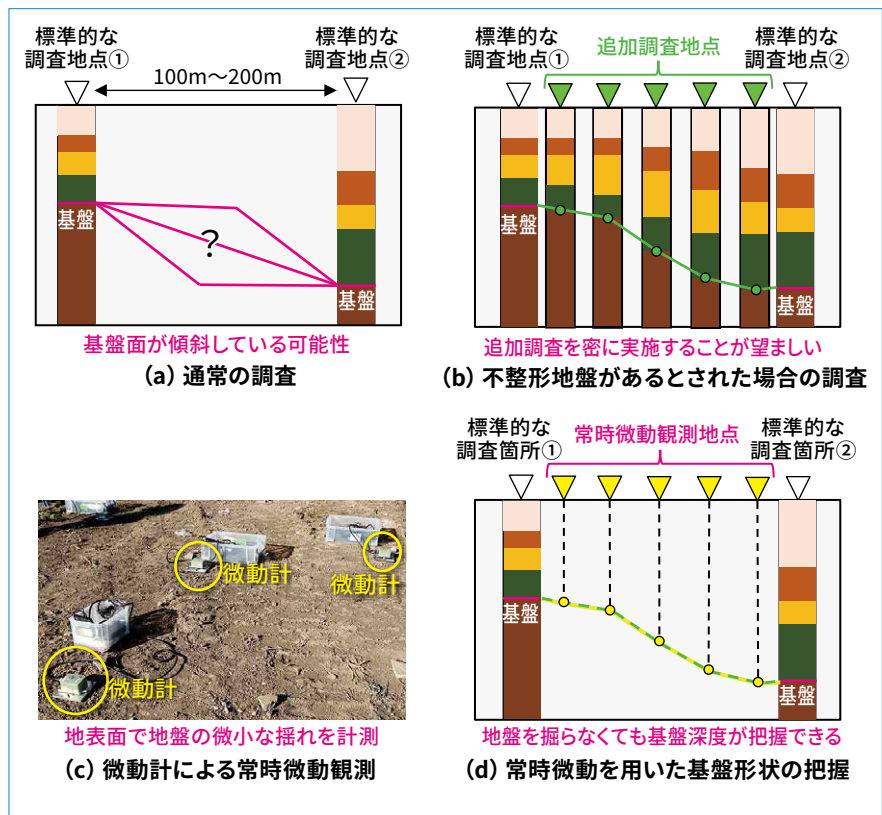


図4 ボーリング調査に代わる微動計を用いた地盤調査手法の概要

適切に把握する方法⁴⁾を開発したので紹介します。

耐震設計上の基礎面の形状を確認するためには、一般的にボーリング調査（※参照）を実施し、硬い地盤が存在する深さを直接把握します。ボーリング調査は、図4(a)に示すように、100m～200m間隔で実施することが標準的ですが、ボーリング調査地点間の基礎の深さは推測するしかありませ

ん。標準的な調査の結果、不整形地盤が存在する可能性がある判断された場合は、図4(b)に示すように、追加のボーリング調査を実施し、詳細に基礎の形状を把握することになります。しかしながら、追加のボーリング調査には大きな手間やコストが掛かるため、密な追加調査には限界があります。

そこで、微動計とよばれる小型の携帯計測器を用いて基礎形状を把握する

ボーリング調査

地盤の状況や耐震設計上の基礎面の深度等を把握する際に用いられる地盤調査です。調査地点の深さ方向に穴を掘り、深さ1mごとに採取した土のサンプルから、土の強度等を把握します。

手法を開発しました。この方法では、**図4 (c)**に示すように、微動計を地表面に30分程度設置して、常時微動(☞参照)を計測することで、**図4 (d)**に示すように、微動計直下の基盤深度を推定できます。

図5 (a)に示すように、常時微動などの揺れには、さまざまな早さ(周期)、大きさの揺れが含まれます。これをスペクトル分析という手法で分析すると、揺れの大きさと周期の関係が得られます。**図5 (b)**に示すように、不整形地盤上の2地点で計測した揺れをスペクトル分析すると、揺れの大きさが最大になる場合の周期(ピーク周期)の差は、基盤の深度差と関係があることがわかっています。鉄道総研では、**図5 (c)**に示すように、さまざまな不整形地盤箇所での常時微動観測や数値シミュレーションを実施し、2地点間の基盤の深度差とピーク周期差の関係を提案しました。これにより、標準的なボーリング調査地点間の複数点で常時微動観測を行うだけで、不整形地盤の形状を適切に把握することができます。

おわりに

鉄道構造物の地震時安全性を高めるための取り組みとして、不整形地盤における揺れの特徴と、不整形地盤の形状を適切に把握する方法を紹介しました。提案方法を用いることで、不整形地盤における揺れの大きさをより効率的かつ適切に算定することにつながり、安全性の高い構造物の設計が可能となります。

今後も、適切な地盤の揺れの評価に資する手法の構築を行っていきたくと考えています。**RRR**

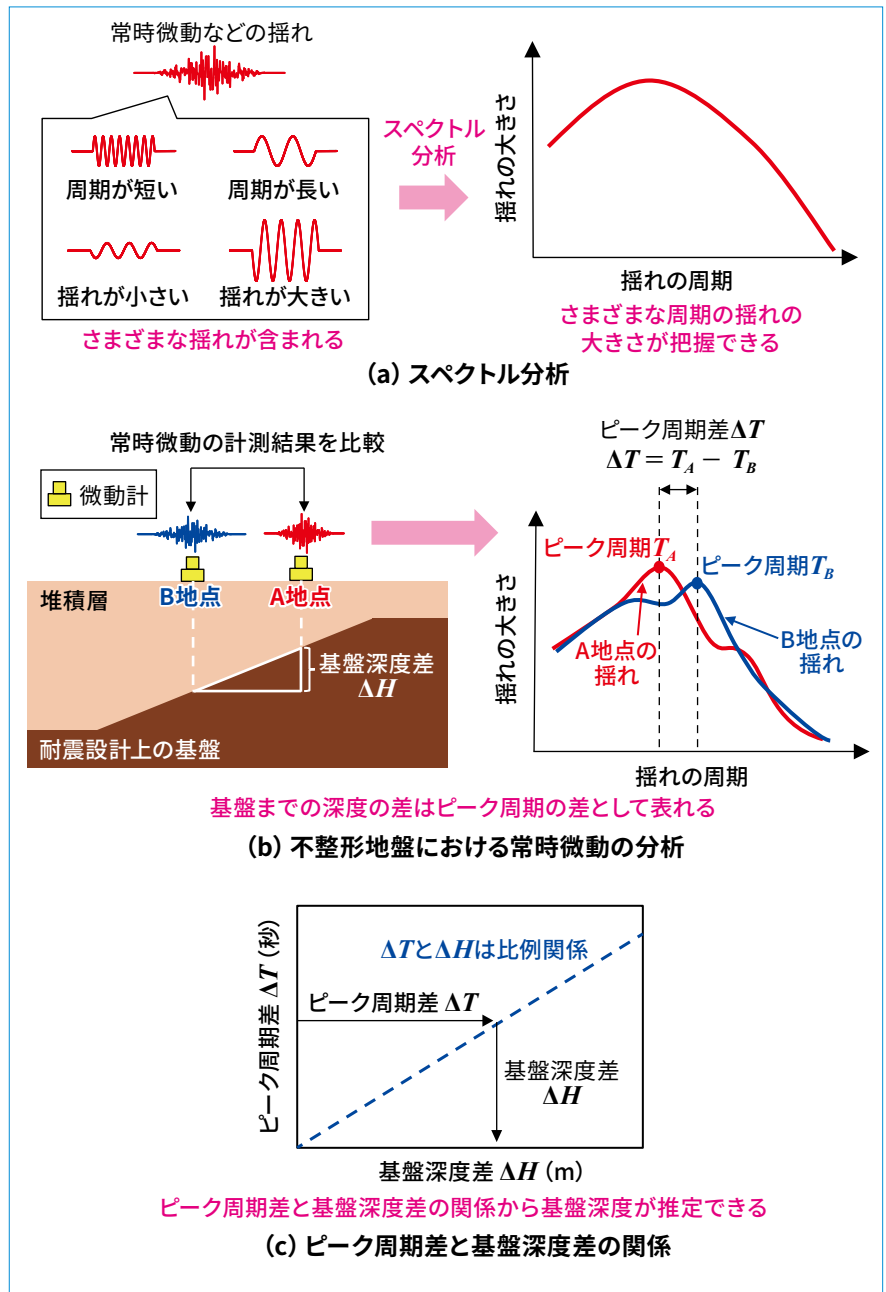


図5 微動計による基盤形状の把握方法の概要

☞ 常時微動

波浪や風などの自然現象や車の走行といった人間活動など、さまざまな原因で生じる微小な揺れのことです。常時微動は、地震動のように地震の発生を待つ必要がなく、常に観測することができます。

文献

- 1) 菊入崇, 室野剛隆, 永妻真治, 西村明彦: 局所的な地盤条件が鉄道高架橋の被害に与える影響について, 第24回地震工学研究発表会講演論文集, 1997
- 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) 石川太郎, 坂井公俊, 室野剛隆, 西恭彦, 曾我大介, 青柳広樹: ランダム振動論に基づく不整形箇所の所要降伏震度スペクトルの補正, 鉄道工学シンポジウム論文集, Vol.23, pp.171-178, 2019
- 4) 田中浩平, 坂井公俊, 飯山かほり, 盛川仁: 常時微動の鉛直成分2点同時観測による工学的基盤形状の推定手法の提案, 土木学会論文集A1, Vol.77, No.1, pp.219-228, 2021