

鉄道山岳トンネル内の地震時の揺れやすさを評価する



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長

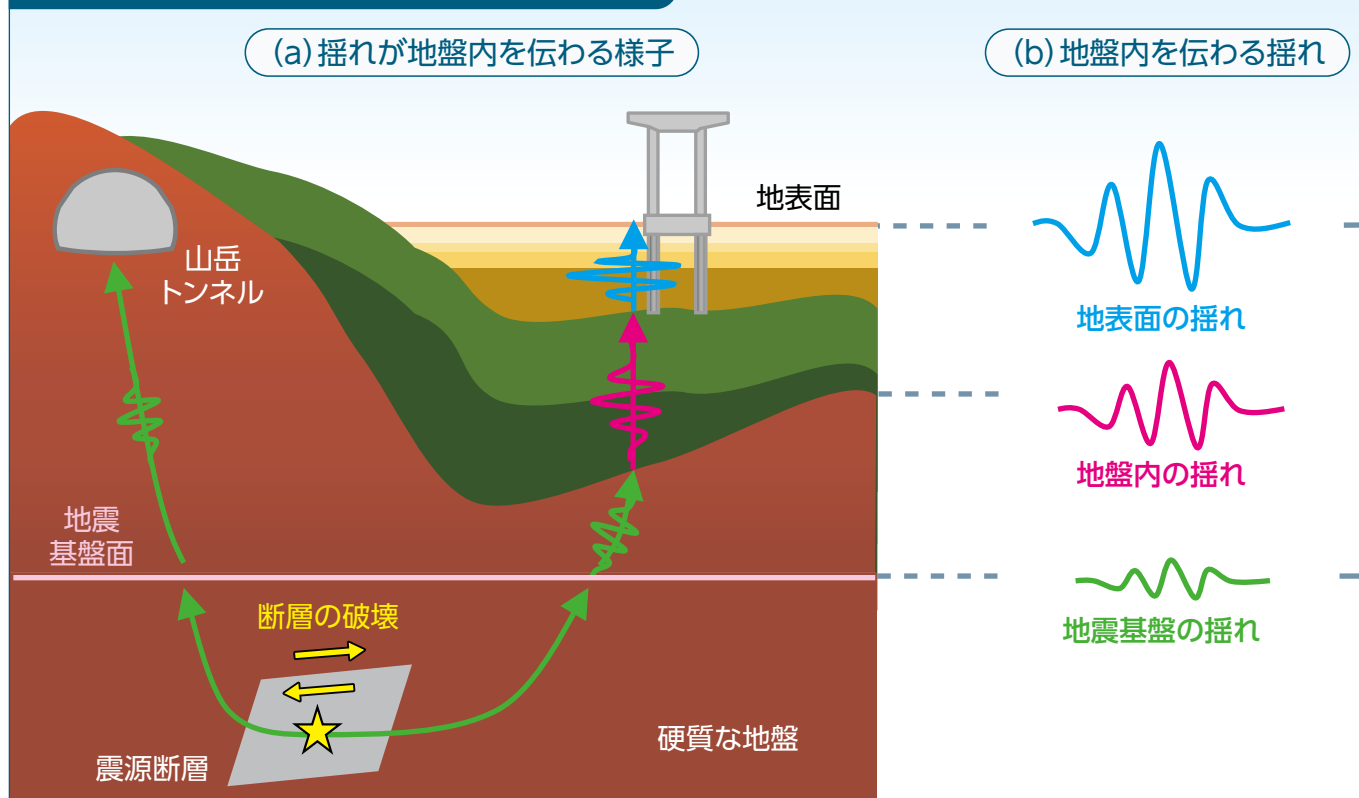
はじめに

鉄道構造物の地震時被害を低減するためには、建設地点における揺れの大きさを適切に評価し、それをふまえて構造物の耐震設計や耐震対策を実施する必要があります。この揺れの大きさは建設地点周辺地盤の影響を受けるため、地盤の揺れやすさを把握することが重要になります。

高架橋や盛土などの鉄道構造物は地上に存在

する一方で、トンネルは地中に存在します。そのなかでも、とくに硬質な地盤内に存在する山岳トンネル内の揺れは、地上と比べて小さいことが考えられます。ここでは、鉄道山岳トンネル内において実際に地震観測を行い、トンネル周辺地盤の揺れやすさを評価した事例について紹介します。

図1 地盤内を伝わる揺れとサイト増幅特性のイメージ



地盤の揺れやすさ

地中奥深くの震源断層で発生した地震による揺れは、**図1(a)**に示すように地盤内を伝わり、地表面に到達します。一般的に深部に存在する地盤ほど硬く、浅部に存在する地盤ほど軟らかくなっていきますが、地中を伝わる揺れは硬い層から軟らかい層に伝わることで大きくなる(増幅する)性質があります(**図1(b)**)。したがって、地表付近の揺れは震源断層が位置する周辺の**地震基盤**の揺れよりも大きくなり、地点ごとの地盤の揺れやすさはその地点周辺の地盤構成により異なることとなります。なお、地盤の硬さは一般的に**せん断弾性波速度**という地盤内を伝わる揺れ(波)の速さで表されるため、以降では地盤の硬さをせん断弾性波速度で表しますが、硬い地盤ほどせん断弾性波速度は大きくなります。

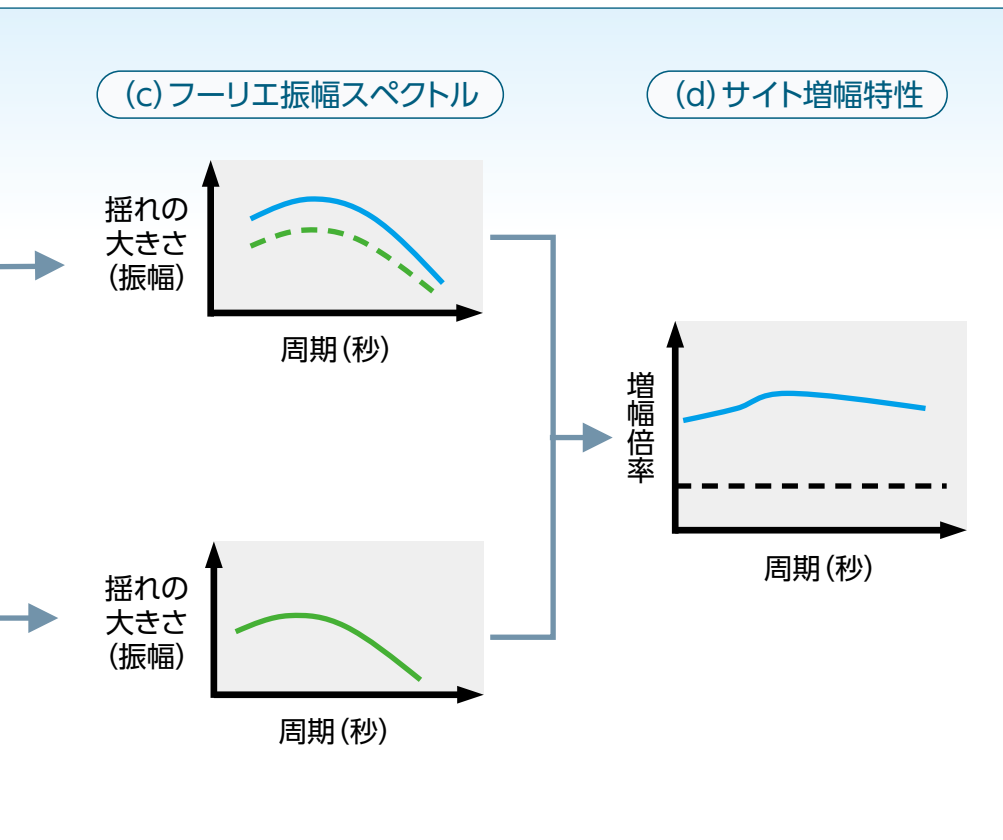
地震による地盤の揺れにはさまざまな“速さ(周期)”と“大きさ(振幅)”の揺れが含まれてい

ます。そのため、地震による揺れを分析するときには、揺れの周期と振幅の関係を表す「フーリエ振幅スペクトル」(**図1(c)**)を算定して用います。地震による揺れが増幅することというのは、このフーリエ振幅スペクトルが増幅していることを表しています。地震工学の分野では、とくに地震基盤に対する各地点の揺れのフーリエ振幅スペクトルの倍率を示したものを「サイト増幅特性」(**図1(d)**)とよび、地盤の揺れやすさを表す指標として用いています。このサイト増幅特性は、各地点における地震の観測記録から算定することが可能です。

図1(a)に示すように、山岳部は地盤が硬質であり、そのような地盤中に存在する山岳トンネルのサイト増幅特性は地表面と比べて小さく、地震時の揺れも小さいと考えられます。

山岳トンネル内の地震観測

実際に山岳トンネル内とその周辺の地表面位



地震基盤

震源断層が存在するような、せん断弾性波速度が3000m/s程度の非常に硬質な地層を指します。震源からの距離が大きく違わなければ、地震基盤における揺れの大きさはいずれの地点でも同じと考えることが一般的です。

せん断弾性波速度

地震動などの横揺れが地層中を伝わる速度のことを表し、地層の軟硬を表す指標です。Vsと表記されることが多く、Vsが大きいほど硬く、Vsが小さいほど軟らかい地層であることを表します。

図2 地震観測の実施地点

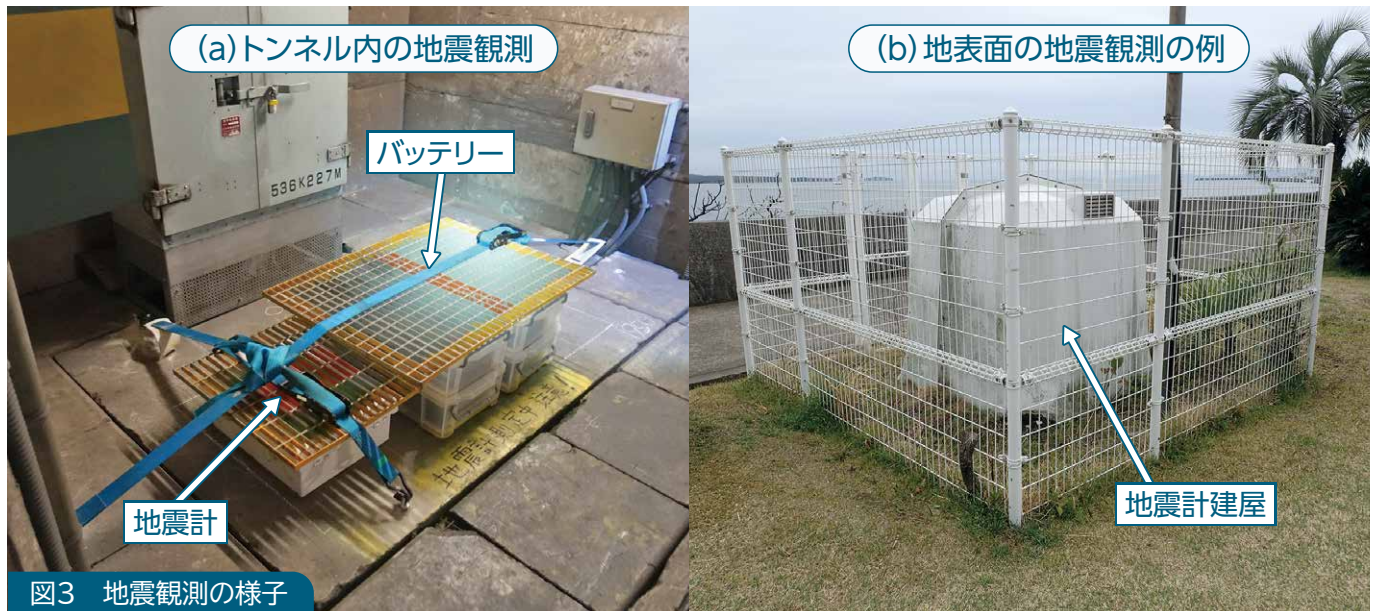
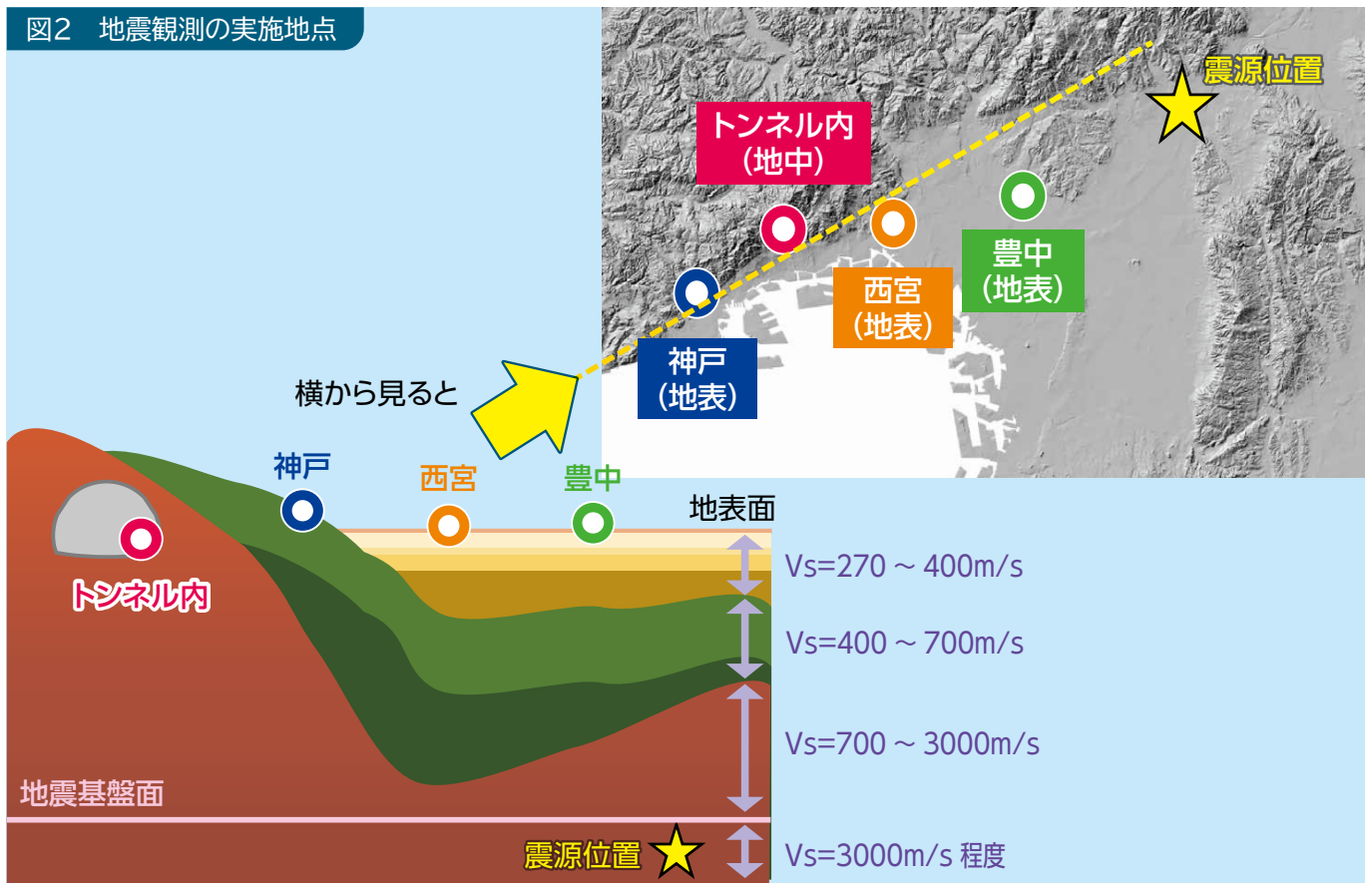
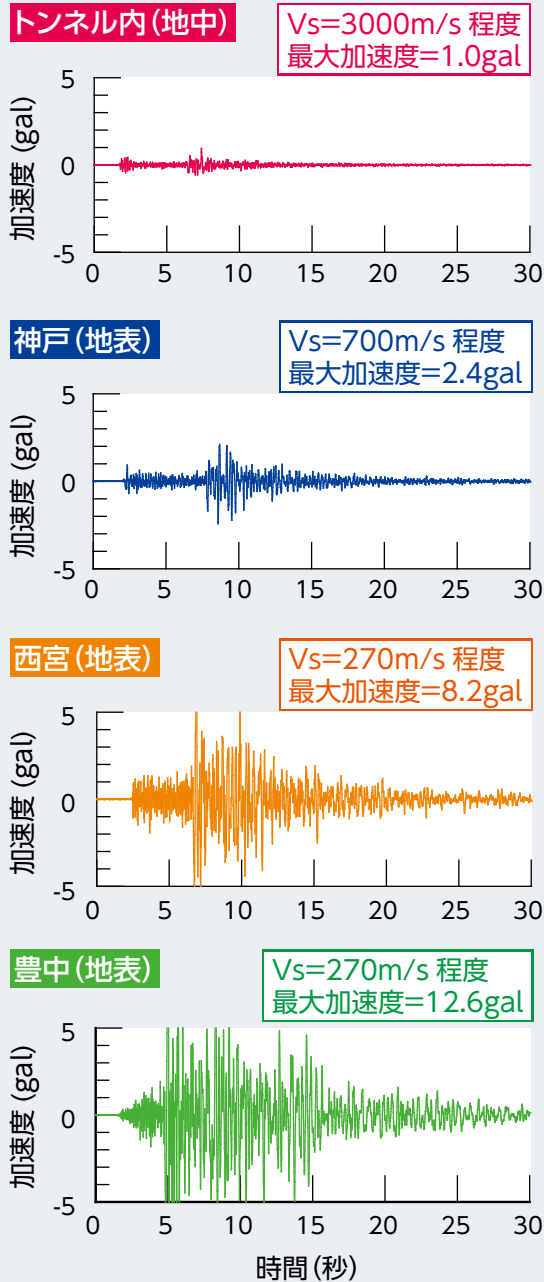


図3 地震観測の様子

置で地震観測を行い、揺れの大きさを比較した事例を紹介します。観測を行ったのは図2に示す地点¹⁾で、山岳トンネル周辺の地盤はせん断弾性波速度が約3000m/s程度の花崗岩で形成されており、地震基盤に相当するような非常に硬質な岩盤です。地表の観測点(神戸、西宮、豊中)は市街地や山の中腹に存在しており、地

盤のせん断弾性波速度は西宮、豊中の観測点で270m/s程度、神戸の観測点で700m/s程度となっています。地震観測の状況を図3(a)(b)に示しますが、山岳トンネル内における地震観測には、鉄道総研が所有する地震計を設置して観測を行いました。地表面については、防災科学技術研究所が運用する地震観測点²⁾が日本全国

(a) 加速度波形



(b) フーリエ振幅スペクトル

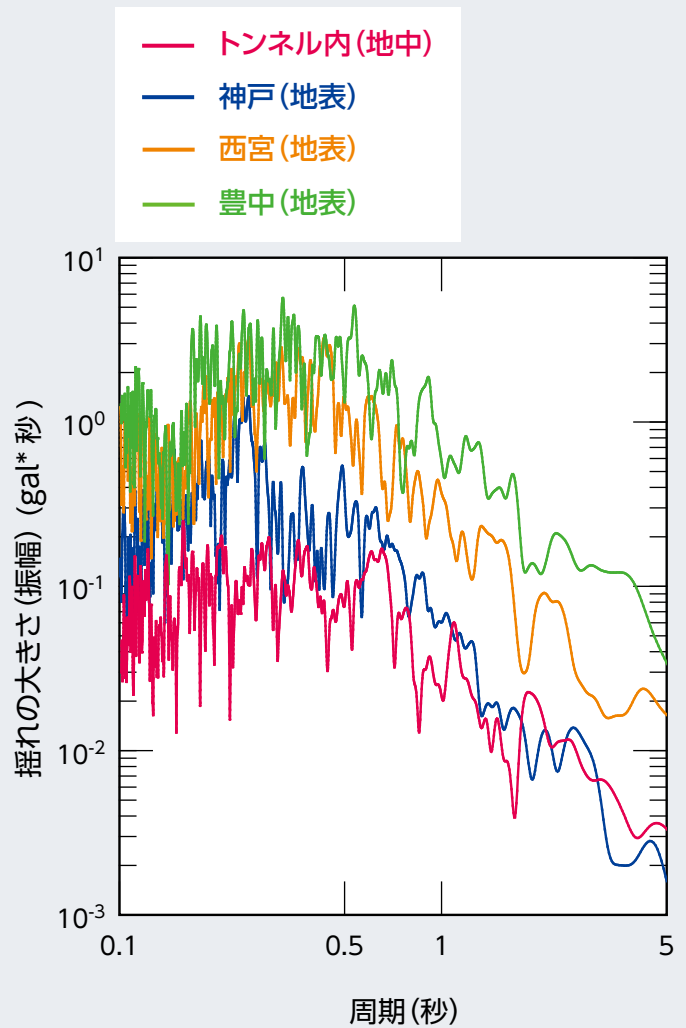


図4 地震観測記録の分析例 (2018/6/23 23:08 マグニチュード4.0, 震源深さ11km)

に存在しており、その観測結果を用いました。

図2に示す震源で発生した地震の観測記録を図4(a)に示します。同じ地震の観測記録であっても、地点によって揺れの大きさを示す加速度が異なっていることがわかります。この各地点における揺れのフーリエ振幅スペクトルを算定した結果を図4(b)に示します。山岳トンネル

内で観測された地震記録に含まれているさまざまな周期の振幅は、3つの地表面の記録と比較して全周期帯で小さいことが確認できます。また、地盤のせん断弾性波速度が比較的大きい神戸では、西宮、豊中と比べて全周期帯で振幅が小さいこともわかります。

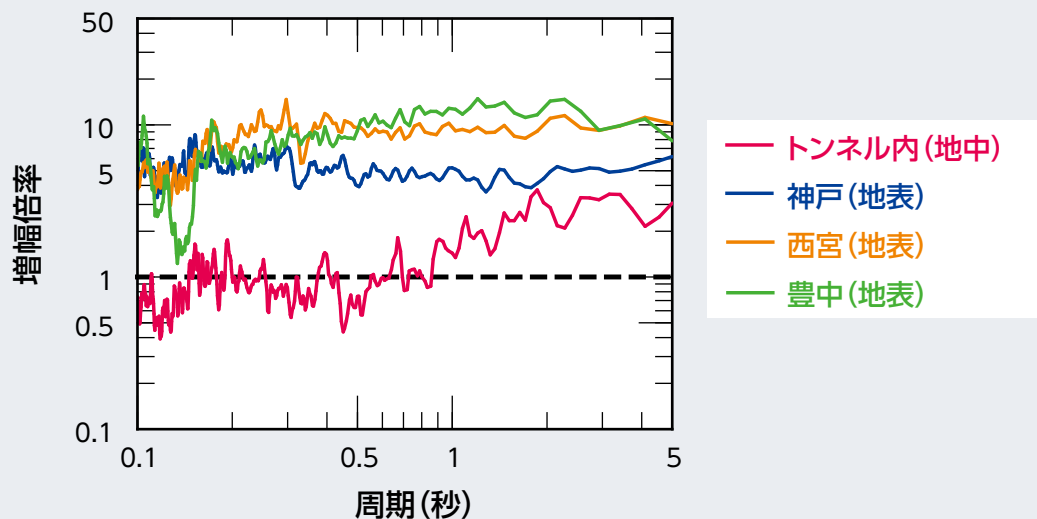


図5 地表面と山岳トンネル内のサイト増幅特性

山岳トンネル内のサイト増幅特性

防災科学技術研究所が運用する地表の観測点 (K-NET)²⁾では、これまで観測されてきた多数の地震記録を用い、日本全国の観測点位置において、各観測点と地震基盤におけるフーリエ振幅スペクトルの比率であるサイト増幅特性が算定³⁾されています。これらの結果と今回実施した地震観測の結果を用いて、山岳トンネル内のサイト増幅特性を評価しました。

図2に示した各地点におけるサイト増幅特性を図5に示します。算定した山岳トンネル内の増幅倍率は、地表の観測点よりも小さく、山岳トンネル周辺の地盤は地表と比べて非常に硬質であることを示しています。また、周期0.1~1.0秒で1.0倍程度となっており、地震基盤の揺れが増幅することなく、ほぼそのままの大きさで山岳トンネル内に到達していることを表しています。以上より、山岳トンネル内は地表と比べて揺れにくいと解釈できます。

山岳トンネル内における揺れの予測

各地点のサイト増幅特性が把握できれば、任意の地震における各地点の揺れを予測することができます。例えば、マグニチュード6.5相当の地震が直下で発生した場合を想定して、山岳トンネル内 (地中) と山岳トンネルにもっとも

近い神戸の観測点 (地表) における揺れを計算した結果を紹介します。まず、図6に示すように地震基盤における揺れを計算⁴⁾し、フーリエ振幅スペクトルを求めます。これに地震観測記録から算定されたサイト増幅特性 (図5) を掛け合わせることで、トンネル内と地表 (神戸) の揺れのフーリエ振幅スペクトルを求め、両地点の揺れを計算しました。その結果、トンネル内の揺れは地表の揺れよりも小さく推定されていることがわかります。このように、地震観測記録を用いてサイト増幅特性を把握することで、地点ごとの揺れの大きさを予測することが可能となり、鉄道構造物の地震時被害の低減につながることができます。

おわりに

地震による鉄道構造物の被害を低減するための取り組みとして、鉄道山岳トンネル内における地盤の揺れやすさの評価事例について紹介しました。鉄道構造物の建設地点における地震観測を行うことで、地盤の揺れやすさを適切に把握でき、その地点の揺れの大きさを予測できます。これにより、地震対策レベルの決定や優先的に対策すべきエリアを合理的に判断することが可能となります。RRR

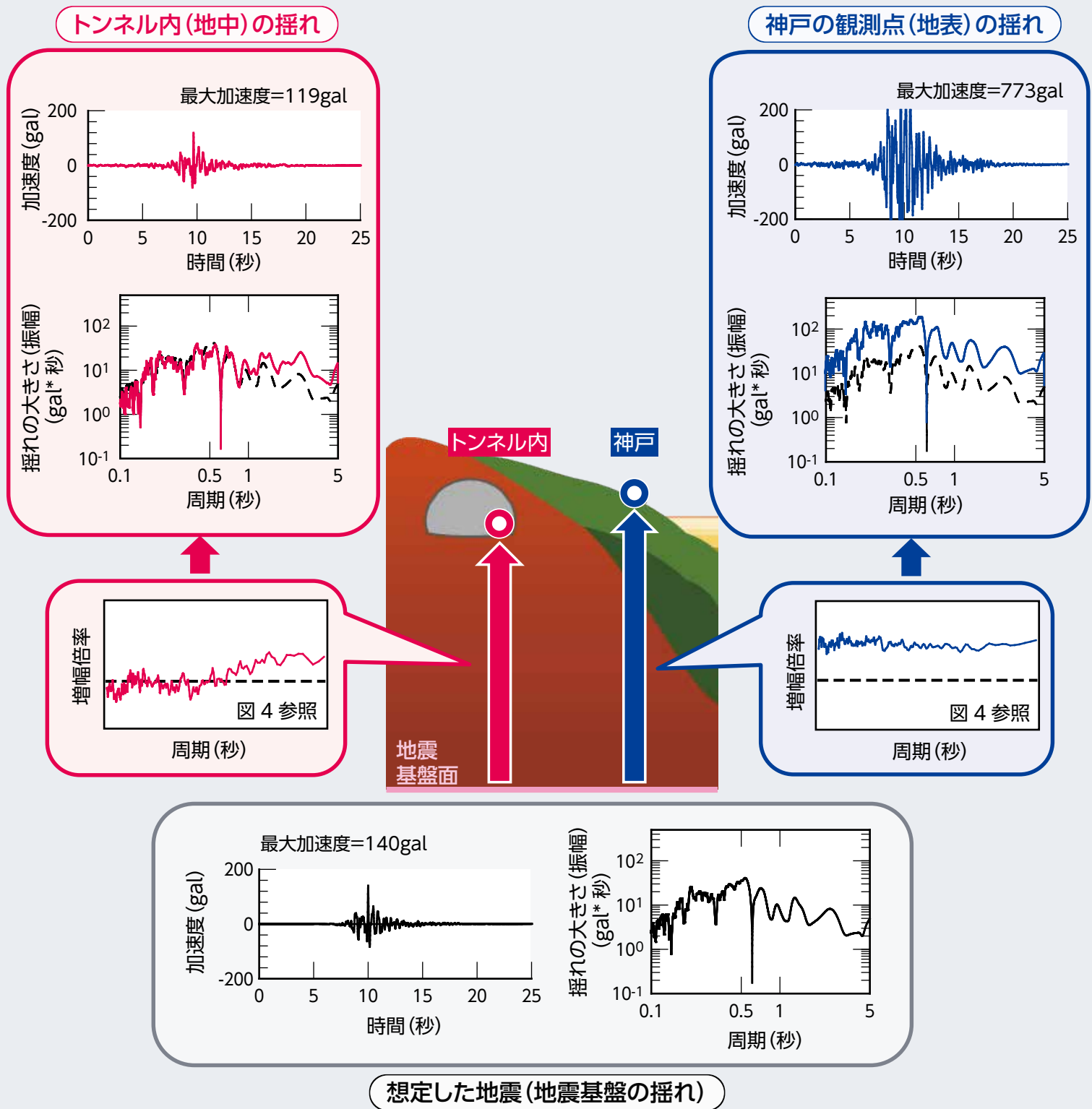


図6 地表面の揺れの計算イメージと計算結果

文献

- 1) 田中浩平, 坂井公俊, 村越雄太, 井出剛: 地震観測記録に基づく山岳トンネル内部における地震増幅特性の評価, 鉄道総研報告, Vol.33, No.12, 2019
- 2) 防災科学技術研究所: 強震観測網 (K-NET, KiK-net), https://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/docs/kyoshin_index.html (入手日: 2022年10月3日)
- 3) 野津厚, 長尾毅, 山田雅行: スペクトルインバージョンに基づく全国の強震観測地点におけるサイト増幅特性とこれを利用した強震動評価事例, 日本地震工学会論文集, 第7巻, 第2号, pp.215-234, 2007
- 4) 田中浩平, 坂井公俊: 地震基盤波形データベースを用いた設計地震動評価に関する検討, 鉄道工学シンポジウム論文集, pp.45-50, 2017