

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

田中 浩平* 坂井 公俊** 村越 雄太*** 井手 剛***

Evaluation of Seismic Amplification in Mountain Tunnel based on Seismic Observation Records

Kohei TANAKA Kimitoshi SAKAI Yuta MURAKOSHI Takeshi IDE

Evaluating the seismic performance of railway structures and train running safety during an earthquake, it is necessary to simulate the ground motions at each site. In ground motion evaluation, it is indicated that the seismic amplification of deep subsurface structures strongly affect to the simulated ground motions. This factor is beginning to consider in the seismic design of civil structures. However, there was few cases to evaluate the seismic amplification in a mountain tunnel. The amplification would be much smaller than the one evaluated for structures built on the ground level. In this paper, based on seismic observations, we try to evaluate the amplification in the Rokko-tunnel. As a result, we confirm that its amplification at period range from 0.1 to 1.0 seconds is about 1.0 times which is equivalent to the amplification on the seismic bedrock.

キーワード：地震増幅特性，構造安全性，車両走行安全性，山岳トンネル

1. はじめに

地震時の鉄道構造物の安全性や車両の走行安全性を評価するために、路線各位置で将来発生する地震動を適切に評価することが求められている。平成24年鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計（以下、鉄道耐震標準）¹⁾では、地震動評価において、耐震設計上の基盤面～地震基盤までの、深部地盤における地震増幅特性（設計用サイト増幅特性）を把握することの重要性が指摘されている。その結果、近年の鉄道構造物の耐震設計において、建設地点の設計用サイト増幅特性を考慮した検討を行う事例が増えている。

設計用サイト増幅特性は、図1に示す深部地盤における地震増幅特性である。一般的な地上部の構造物では、深部地盤は、 $V_s=400\text{m/s}$ 相当の地層（耐震設計上の基盤）を上面とし、 $V_s=3000\text{m/s}$ 相当の岩盤（地震基盤）を下面とする地盤として定義される。

公的な地震観測点 K-NET²⁾において観測された地震記録を用いて、観測点ごとに地表面までの地震増幅特性（地表面サイト増幅特性）が評価、公開されている³⁾。この結果から、浅層地盤のボーリング調査結果に基づいて評価した表層地盤の増幅特性を除すことで、設計用サイト増幅特性を評価している（図2）⁴⁾。この図にお

る縦軸は、地震基盤から耐震設計上の基盤までの地震動の増幅倍率を表している。この結果から、全国平均値の設計用サイト増幅特性は3～5倍程度、全国平均値+標準偏差は5倍～10倍程度の増幅倍率となる。

鉄道耐震標準に記載されている、簡易な手法により算

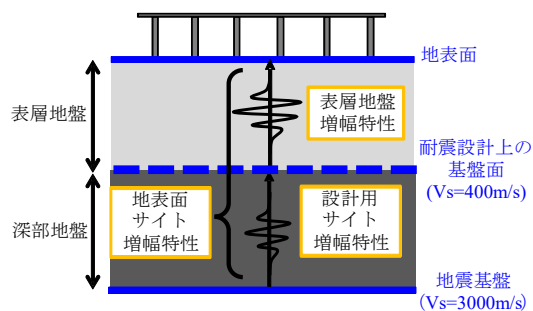


図1 設計用サイト増幅特性の定義

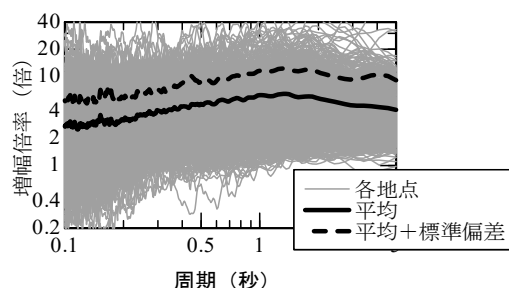


図2 全国 K-NET 観測点における設計用サイト増幅特性

* 鉄道地震工学研究センター 地震動力学研究室
 ** 鉄道地震工学研究センター 地震応答制御研究室
 *** 西日本旅客鉄道株式会社 新幹線鉄道事業本部

特集：地震対策技術

定するL2地震動（以下、標準地震動）は、設計用サイト増幅特性として全国平均値+標準偏差を想定しているが、これを上回るサイト増幅特性となる地点は、深部地盤の増幅が相対的に大きな地点と考えられる。一方でこの値を大きく下回るようなサイト増幅特性となる地点では、将来発生することが想定される地震動も小さくなる。

山岳トンネルは、一般的に図1に示す耐震設計上の基盤面よりさらに深く、硬質な岩盤内に存在するため、図2に示す地上部の設計用サイト増幅特性と比べて小さくなることが想定される。しかし、その大きさを定量的に評価した事例はほとんど見られない。そこで本論文では、六甲トンネル内部において短期間の観測を実施することで地震記録を取得し、この記録を整理することで、山岳トンネル内部の設計用サイト増幅特性の評価を試みた。

本論文では、2章にて評価地点である六甲トンネル内部の鶴甲横坑地点について説明する。続いて、3章では本地点で実施した地震観測の概要と取得した記録の特徴について説明する。4章では、地震記録に基づいて設計用サイト増幅特性を評価する方法について説明し、最後に5章にて評価結果を示す。

2. 検討対象地点の概要

評価対象の山岳トンネルは、山陽新幹線新大阪駅～新神戸駅間にある六甲トンネルとし、図3に示す位置にある鶴甲斜坑の軌道位置において評価を実施した。評価地点は、新大阪起点25.1km～27.6kmの2.5km区間内であり、南側には兵庫県南部地震で震災の帯と呼ばれた鷹取～西宮地域がある。

評価地点の詳細図を図4に示す。鶴甲斜坑は、石屋川左岸に地上孔があり、軌道位置に達するまでの長さは447mである。地震観測を実施した地点は、山陽新幹線軌道から20m程度離れた地点にあり、軌道との標高差は小さい。周辺の地質の大部分は、本御影と呼ばれる六甲花崗岩である。本区間は、五助橋断層、大橋断層やこれらの副断層による破碎帯が集中するエリアであり、岩の硬さが弱体化している区間もある。しかし、本区間で弾性波探査により得られた速度分布は2.9km/s以下が41%、3.0～3.9km/sが27%、4.0km/sが32%となっている⁵⁾。つまり、地震基盤のS波速度が3.0km/s程度であると考え、評価地点はわずかに弱体化している可能性があるものの、地震基盤に該当するような、非常に硬質な岩盤内にあることがわかる。

3. 地震観測の概要

地震観測は2018年5月～10月の約5ヶ月間実施した。観測にはNanometrics社製Titan加速度計を使用し、白

山工業製ロガーLS8800により記録を収集した。

設置した地震観測システムの全体構成を図5に示す。システムは2つの筐体からなり、1つには地震計とロガー、1つには12個のカーバッテリーが収納されている。本地点は、安定した電源を確保することが難しかったた



図3 評価地点の位置

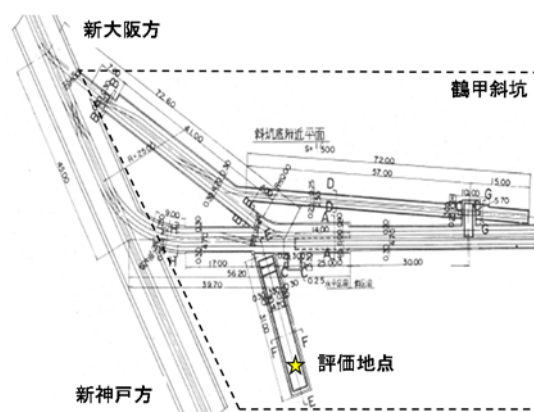


図4 地震観測の実施地点

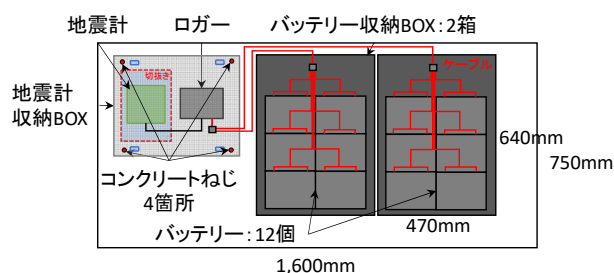


図5 設置した地震観測システムの全体構成



図6 地震計の設置状況

め、5ヶ月間の観測期間中の電力をカーバッテリーから給電した。また、GPSによる時刻校正が難しかったため、記録の絶対時刻はロガーの内部時計の時刻としているが、この誤差は最終的な結果には影響はない。

地震計の設置状況を図6に示す。地震計を収めたケースは、底部に穴があけてあり、地震計はコンクリート床に固定せずに設置した。ケースは4隅をコンクリートねじで固定しており、振動時にケースがセンサーに接触することはない。また、新幹線通過時の風圧等によるケースの飛散を防ぐために、ケースを紐で床に緊結している。

観測期間中に発生した地震から、設計用サイト増幅特性の評価に用いる地震記録として、Mj 2.9以上6.0未満、震央距離150km以内、最大加速度100ガル未満の条件を満たす記録を抽出した⁶⁾。地震規模の上限は地震記録が震源断層の破壊過程の影響を受けにくくするために、また、震央距離の上限は震源由来の表面波の影響を小さくするために設定した。最大加速度の上限は、地盤非線形性の影響を避けるために設定しており、2018年6月18日に発生した大阪府北部地震の記録はこの条件により除外されている。選定された各地震記録のフーリエ振幅スペクトルの長周期成分を目視確認することで、低周波数側の0.5Hz程度まで有効な記録であることを確認した。その結果、用いた地震記録のMjの下限を2.9とした。

選定された各記録の地震諸元を表1に、概略の震央位置を図7に星印で示す。いずれも大阪府北部地震の余震であるため、震源位置はほぼ同一箇所である。図8に2018年6月23日に発生した地震により観測された地震動を示している。比較のため、付近のK-NET観測点の記録も示している。図8に示す時刻歴波形は、S波初動の位置を合わせて表示しているが、6秒付近のパルスをはじめとして初動付近の位相特性は良く似ている。

図9に示すフーリエ振幅スペクトルは、評価地点では明瞭なピークが見られないものの、地表位置のK-NET

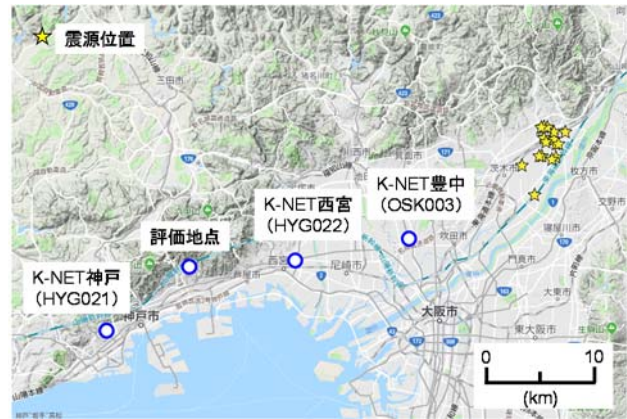


図7 用いる地震の震央位置と周辺公的地震観測点位置

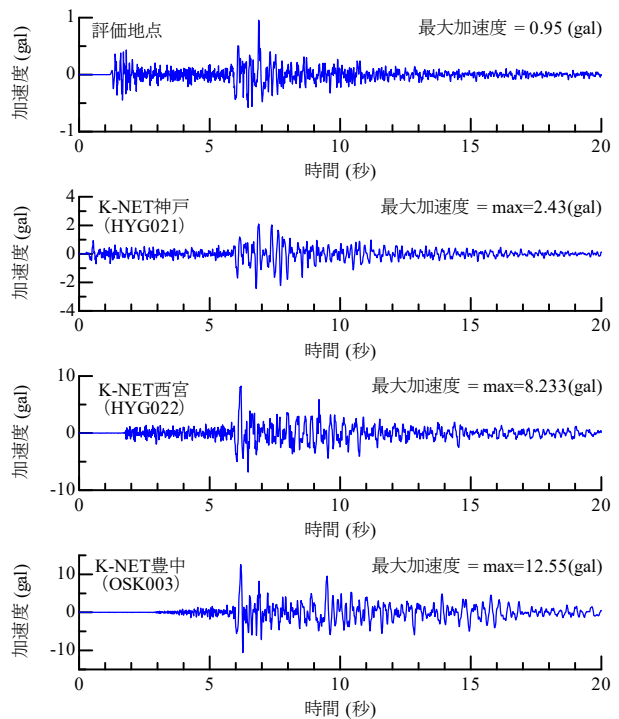


図8 加速度時刻歴波形 (No.11の地震)

表1 設計用サイト増幅特性の評価に用いた地震の諸元

No	発震日時	緯度	経度	深さ(km)	Mj
1	2018/06/18 08:18:19	34.847	135.620	12.0	3.0
2	2018/06/18 08:42:06	34.853	135.620	13.0	3.3
3	2018/06/18 12:36:50	34.853	135.632	12.0	3.3
4	2018/06/18 13:56:43	34.833	135.608	12.0	2.9
5	2018/06/18 16:31:48	34.858	135.610	11.0	3.5
6	2018/06/19 04:53:10	34.843	135.625	13.0	3.9
7	2018/06/19 06:50:05	34.848	135.610	12.0	3.5
8	2018/06/19 07:52:01	34.845	135.612	11.0	3.9
9	2018/06/19 14:15:38	34.833	135.605	10.0	3.1
10	2018/06/20 03:47:38	34.857	135.613	11.0	3.4
11	2018/06/23 23:08:46	34.832	135.622	11.0	4.0
12	2018/07/01 12:42:09	34.857	135.607	12.0	3.5
13	2018/07/08 15:45:40	34.830	135.618	10.0	3.9
14	2018/07/15 01:59:46	34.825	135.587	11.0	3.4
15	2018/08/28 19:53:16	34.800	135.600	10.0	4.0

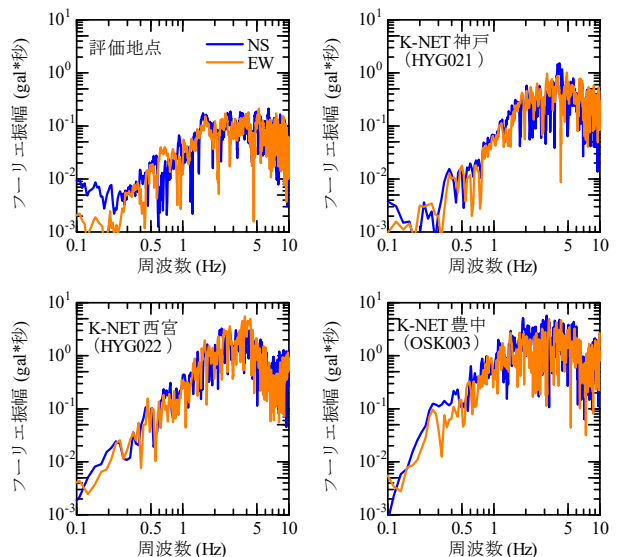


図9 フーリエ振幅スペクトル (No.11の地震)

特集：地震対策技術

観測点では地盤増幅特性に応じたピークが見られる。また、K-NETの各観測点のピークにあたる5Hz付近の振幅は、評価地点に比べて10倍程度の値となっていることがわかる。詳細は4章にて述べるが、本論文では図9におけるフーリエ振幅スペクトルの比を補正係数として、K-NET観測点の地表面サイト増幅特性に乗じることで、評価地点の設計用サイト増幅特性を評価する。なお、地表面サイト増幅特性は、前述の通り、図1の設計用サイト増幅特性に表層地盤の増幅特性を含めた地表面位置で定義されるサイト増幅特性である。

4. 設計用サイト増幅特性の評価方法

設計用サイト増幅特性を評価するにあたっては、スペクトルインバージョンを実施することが一般的である⁶⁾。しかし、本検討では実務における活用に配慮し、地表面サイト増幅特性が既に評価³⁾されているK-NET観測点を基準点として、これを補正することで評価地点の設計用サイト増幅特性を評価した⁷⁾。評価地点と基準点となるK-NET観測点の位置関係は図7に示す通りである。設計用サイト増幅特性の具体的な評価手順は以下の通りである(図10)。

- ① 評価地点と基準K-NET観測点において同一地震で観測された地震記録のペアを整理する。
- ② 各地震記録に対してフーリエ振幅スペクトルを算定し、ペアごとにスペクトル比(評価地点/K-NET)を評価する。
- ③ このスペクトル比から、各地震記録の距離減衰の違いを考慮して、震源から地震動が拡散することによる減衰効果を表す幾何減衰効果の補正を行う。具体

的には、震源距離の逆数に応じた補正を行う。

- ④ ①～③の作業を表1に示す全ての地震ペアに対して行い、全結果を平均したものを2観測点の補正係数とする。
- ⑤ この補正係数を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、評価地点の設計用サイト増幅特性を評価する。

フーリエ振幅スペクトルを評価する際に用いた波形は、S波を含む160秒間の波形とした。これは、サイト増幅特性に地震動の後続部に含まれる表面波の影響を考慮するためである。抽出した波形に対して、5% cosineテーパーを施した後に、0.05Hzのparzen-windowによるフィルタ処理を施したフーリエ振幅スペクトルを算出した。水平2成分に対して独立に評価されたスペクトルを、ベクトル和(2乗和平方根)したものを最終的なスペクトルとした。なお、本検討では④にて全地震のスペクトル比を平均したものを補正係数としている。これは、基準点の地表面サイト増幅特性も平均値で評価されており、評価地点の設計用サイト増幅特性も平均値で評価したためである。しかし、実際の設計等に用いる場合には、スペクトル比には震源特性等の違いによるばらつきが生じるため、このばらつきを考慮して、平均値より大きめの補正係数を設定することもできる。

5. 設計用サイト増幅特性の評価結果

本検討では、評価地点から離間距離が近い3つのK-NET観測点を選定し(表2)、それぞれを基準点とした場合の評価を実施している。これは3地点を基準としてそれぞれ独立に評価した設計用サイト増幅特性のばらつきを確認することで、最終的な評価結果の信頼性を把握することを目的としている。

基準となるK-NET観測点において既知の地表面サイト増幅特性を図11に示す。これらの地点のうち、K-NET西宮の増幅倍率は広い周期帯で10倍程度となっていることから、地盤増幅が相対的に大きい地点と捉えることができる。この傾向は、この地点が震災の帯に含まれる観測点であったことも整合する。

表2に示した数の地震記録に対して、基準点ごとに評価した補正係数を図12に示す。どの観測点を基準にし

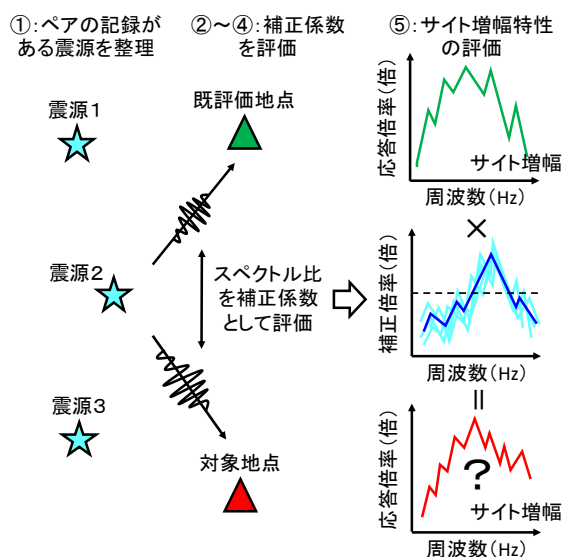


図10 設計用サイト増幅特性の評価手順³⁾
(図内丸数字は4章の手順と対応)

表2 用いた地震記録の数と評価地点との離間距離

基準 K-NET	データ数	離間距離 (km)
K-NET 西宮	11	9.5
K-NET 神戸	5	10.0
K-NET 豊中	15	20.5

た場合でも、短周期領域の補正係数は、基準点に対して1.0倍を大きく下回る0.1倍程度の倍率になることがわかる。

図11に示した各基準点の地表面サイト増幅特性に、図12で評価した補正係数の平均値を乗じて、評価地点の設計用サイト増幅特性を評価した結果を図13に示す。

3地点を基準とした設計用サイト増幅特性は、概ね同様の結果となっており、得られたサイト増幅特性の信頼性が高いことが確認できる。評価された設計用サイト増幅特性は、周期0.1～1.0秒で1.0倍程度となっており、ほぼ地震基盤露頭に相当する増幅特性(増幅なし)となっていることがわかった。この結果は、本地点の地盤が非常に硬質であることと地中内部での増幅特性を評価していることが原因と考えられる。一方、1.0秒を超える長周期成分については、図11に示す地表面サイト増幅特性に漸近している。その値は1.0倍より大きい値となっており、地震基盤からの増幅がみられることがわかる。

また、3地点で評価された設計用サイト増幅特性が完全に一致していない点については、それぞれの観測点における距離減衰効果が、幾何減衰のみを考慮した簡易な補正では十分でなかった可能性が示唆される。

そこで、図14に司・翠川の最大速度の距離減衰式⁸⁾を用いて、 $M_w=3.0$ 、震源深さ10kmの地震で評価した最大速度PGVを震源距離10km地点のPGVで正規化したものを示す。この地震諸元には、本検討で使用した記録の諸元に近いものを設定している。図には幾何減衰(震源距離の逆数 $1/r$)の効果のみを考慮した場合の値も併せて示している。これらと比較すると、震源距離が遠い地点で両者の差が大きいことがわかる。これは、伝播経路の内部減衰による減衰効果が無視されているためである。よって、震源から離れるほど距離減衰を補正した後の地震動が過少評価されている。補正係数として評価地点/K-NET観測点を取った場合には、震源に対して評価地点より距離が遠いHYG012では過大評価、距離が近いOSK003では過小評価の補正係数となる。最終的に評価された図13の設計用サイト増幅特性もこの説明に整合している。検討に用いた震源位置がほとんど同

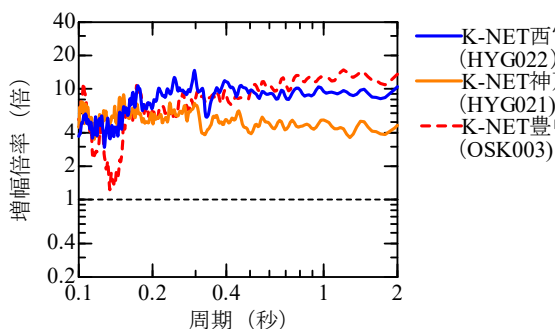


図11 基準 K-NET 観測点の地表面サイト増幅特性³⁾

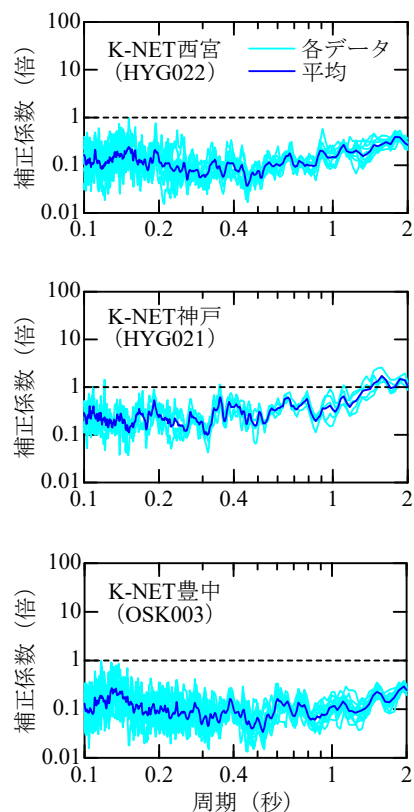


図12 補正係数の評価結果
(評価地点/基準点のスペクトル比)

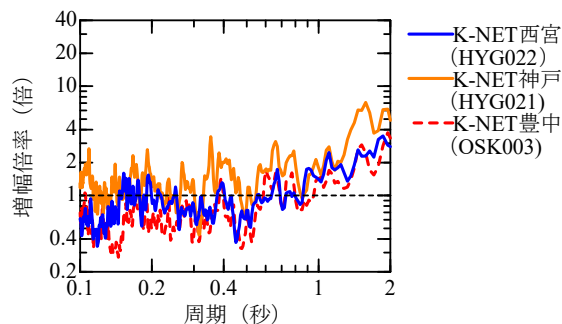


図13 山岳トンネル内の設計用サイト増幅特性

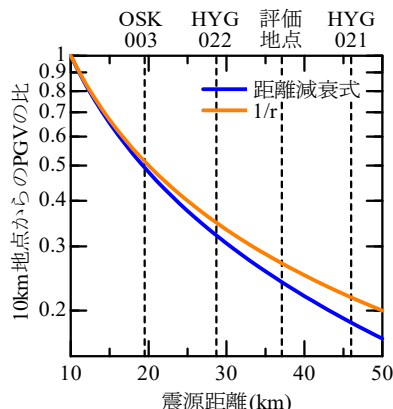


図14 地点ごとの距離減衰効果の違い

特集：地震対策技術

じであるため、この傾向が顕著にみられたと考えられる。

以上から、震源距離が 30km を超えるような記録を使用する場合には、幾何減衰の補正のみでは誤差が大きくなる可能性があり、距離減衰式の活用等も考慮する必要があることが分かった。

6. まとめ

地震動評価にあたって、深部地盤の増幅特性を把握することが重要であるが、山岳トンネルで評価された事例はこれまでほとんどなかった。そこで本検討では、六甲トンネル内で実施した地震観測記録から、設計用サイト増幅特性の評価を実施した。

得られた結果は、周期 0.1 ～ 1.0 秒で、増幅倍率が 1.0 倍と非常に小さくなっていることがわかった。この結果を、全国の地上部を対象として評価された設計用サイト増幅特性の平均値と比較すると、短周期成分について、本地点は地上部と比べて非常に揺れにくいことがわかった。

今後は評価事例を増やすことで、山岳トンネル内部の増幅特性について一般的な傾向を整理することを目的とした検討を実施する。また、本検討で補正係数の評価に使用した地震記録は、震源位置がほとんど同じである。震源位置が違う場合設計用サイト増幅特性に若干の変動が見られる可能性がある。

なお、本検討で評価した設計用サイト増幅特性を用いて、耐震標準に記載される標準 L2 地震動の補正や活断層を特定した強震動予測評価を実施することで、より合理的な設計地震動を設定することができるようになる。

謝辞

本研究では、防災科学技術研究所の K-NET の強震記録を使用させていただきました。

文献

- 1) (公財) 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, 2012
- 2) 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/>, 2019/8/22 参照
- 3) 国土技術政策総合研究所：サイト増幅特性及び、強震観測地点情報, <http://www.ysk.nilim.go.jp/kakubu/kouwan/sisetu/site.html>, 2019/8/22 参照
- 4) 坂井公俊, 室野剛隆, 川野有祐：耐震設計上注意を要する地点の簡易抽出法に関する検討, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.70, No.4, I_527-I_534, 2014
- 5) 大阪幹線工事局：山陽新幹線 新大阪・岡山間建設工事誌, 日本国有鉄道, pp.691-701, 1972
- 6) 野津厚, 長尾毅：スペクトルインバージョンに基づく全国の港湾等の強震観測地点におけるサイト増幅特性, 港湾空港研究所資料, No.1112, 2005
- 7) 田中浩平, 坂井公俊：短期間地震観測で取得した小地震記録によるサイト増幅特性の評価, 第 23 回地震工学シンポジウム, 2019
- 8) 司宏俊, 翠川三郎：断層タイプ及び地盤条件を考慮した最大加速度・最大速度の距離減衰式, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 523 号, pp.63-70, 1999