# 論文 地震観測に基づく山岳トンネル のサイト増幅特性評価の試み

村越 雄太1・井手 剛2・田中 浩平3・坂井 公俊4

<sup>1</sup>正会員 西日本旅客鉄道株式会社(〒530-8341大阪府大阪市北区芝田2丁目4番24号) E-mail:yuuta-murakoshi@westjr.co.jp

<sup>2</sup>正会員 西日本旅客鉄道株式会社(〒530-8341大阪府大阪市北区芝田2丁目4番24号) E-mail:takeshi-ide@westjr.co.jp

<sup>3</sup>正会員 公益財団法人鉄道総合技術研究所(〒185-8540東京都国分寺市光町二丁目8-38) E-mail:tanaka.kohei.22@rtri.or.jp

4正会員 公益財団法人鉄道総合技術研究所 (〒185-8540 東京都国分寺市光町二丁目8-38) E-mail:sakai.kimitoshi.36@rtri.or.jp

鉄道構造物の地震時性能や車両走行性を把握するために、各地点で想定される地震動を適切に評価する 必要がある.近年、地震動評価において、深部地盤の地震増幅特性(サイト増幅特性)を把握することの 重要性が指摘されており、設計実務においても考慮される事例が増えている.このサイト増幅特性は、地 上区間よりも深く、硬質な岩盤内にある山岳トンネル内部で小さくなることが想定されるが、その程度を 定量的に確認した事例は限られている.そこで、山岳トンネルにおける増幅特性の一般的な傾向整理を最 終的な目的とし、本検討では、手始めに六甲トンネル内部の地震観測により取得した記録に基づいて、ト ンネル内部の観測点位置におけるサイト増幅特性を評価した.その結果、評価されたサイト増幅特性は、 鉄道構造物の耐震設計標準で示されるサイト増幅特性の全国平均を大きく下回り、周期0.1~1.0秒の範囲で 概ね1.0倍(地震基盤相当の増幅)となっていることを確認した.

Key Words : site amplification, structural safety, train running safety, mountain tunnel

## 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)<sup>D</sup>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(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.

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、Vs=400m/s 相当の地層(耐震設計上の基盤)を 上面とし、Vs=3000m/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-NET<sup>2</sup>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が

評価,公開されている<sup>3</sup>. 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,深部地盤のサイト増幅特性を評価して いる(図-2)<sup>4</sup>. この図における縦軸は,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 倍率になることがわかっている.

鉄道耐震標準に記載されている、簡易な手法により算





図-2 全国の K-NET 観測点におけるサイト増幅特性

定する L2 地震動(以下,標準地震動)は、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.よっ て、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.そこで本検討では、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 区間内にあ 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, 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 層による破砕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, 弾性波探査による得



図-3 評価地点の位置



図-4 地震観測の実施地点(文献5に加筆)

られる速度分布は良好な堅岩区間を 4.3km/秒程度である と考えると本区間は 2.9km/秒以下が 41%, 3.0~3.9km/秒が 27%, 4.0km/秒が 32%となっている<sup>9</sup>. つまり, 地震基盤 の S 波速度が 3.0km/秒程度であると考えると,評価地点 は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 つのプラケースからなり,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 ったため、5 ヶ月間の観測期間中の電力をカーバッテリ 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



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

ースは、底部に穴があけてあり、地震計はコンクリート 床に直接設置されている。ケースは4隅をコンクリート ねじで固定しており、振動時にセンサーとケースが接触 することはない.また、新幹線通過時の風圧等によるケ ース飛散を防ぐために、紐でケースごと緊結している.

観測期間中に発生した地震から、サイト増幅特性の評価に用いる地震記録として、Mj 29 以上 60 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<sup>9</sup>. 地震規模の上限は震源断層の破壊 過程の影響を受けにくくするため、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が周 波数の自乗に比例すること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、評価に用いた地震記録の Mj の下限は 2.9 となった.

選定された各記録の地震諸元を表-1 に, 震央位置の 概要を図-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, 震央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.比較として,近くの 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 観測点では地盤増幅特性に応じたピークが見られ

表-1 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-7 評価に用いる震央位置と周辺の公的地震観測点位置





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 観測点のサイト増幅特性に乗じること で,評価地点のサイト増幅特性を評価する.

### 4. サイト増幅特性の評価方法

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<sup>9</sup>.しか し、本検討では実務における活用に配慮し、サイト増幅 特性が既に評価<sup>3</sup>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サイト増幅特性を 評価した<sup>9</sup>.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.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).

- 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 観測点のサイト増幅特性に



(図内丸数字は4章の手順と対応)

表-2 補正に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 西宫	11	9.5
K-NET神戸	5	10.0
K-NET豊中	15	20.5

乗じることによって,評価地点のサイト増幅特性を 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 秒間の波形とする. 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 のサイト増幅特性も平均値で評価されており,評価地点 のサイト増幅特性も平均値で評価したいためである. 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. トンネル位置の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 観測点の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 ととも調和的である. なお,本手法では,基準とした K-NET 観測点においては地表位置に設置された地震記 録を用いて補正係数を評価することから,図-11 に示す サイト増幅特性は,地震基盤〜地表面位置までの,表層 地盤増幅特性の影響を含んだ増幅特性を用いている.

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,評価地点のサイト 増幅特性を評価した結果を図-13に示す.なお,ここで 用いた基準点のサイト増幅特性には,深部地盤と表層地 盤の両方の増幅特性が含まれている.

3地点を基準としたサイト増幅特性は、概ね同様な結 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.3地点で評価されたサイト増幅特性が 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.

図-14に司・翠川の最大速度の距離減衰式®を用いて, Mw=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. これらを比較すると、震源距離が遠い地点では両者が離 れていることがわかる.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HYG021では補正係数が過大評価,距離が近い OSK003では補正係数が過小評価となる.最終的に評価 された図-13の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様であるため, この傾向が顕著にみられたと考えられる.



図-11 基準となる K-NET 観測点のサイト増幅特性<sup>3</sup>



図-13 山岳トンネル内のサイト増幅特性(基準点ごと)



図-14 山岳トンネル内のサイト増幅特性(基準点ごと)

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,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サイト増幅特 性の平均値と比較すると,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様である. 震源位置の違いにより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もできるようになる.

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.

#### 参考文献

- (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.
- 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/, 2019/3/15 参照
- 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, 2019/6/1参照
- 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, L527-L534, 2014.
- 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.
- 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.

(2019.4.5 受付)

# EVALUATION OF SEISMIC AMPLIFICATION IN A MOUNTAIN TUNNEL BASED ON SEISMIC OBSERVATIONS

#### Yuta MURAKOSHI, Takeshi IDE, Kohei TANAKA, Kimitoshi SAKAI

It is necessary to simulate the ground motions assumed to occur at each site for evaluating the seismic performance of railway structures and train running safety during an earthquake. In ground motion evaluation, it indicates that the seimic amplification of deep subsurface structures strongly affect to the simulated ground motions. This factor is begining to consider in the sesmic design of civil structures. However, there was few case to evaluate the seismic amplification in a mountain tunnel. The amplification becomes much smaller than the one evaluated for structures built on the ground level. So, in this paper, we try to evaluate the amplification in the Rokko-tunnel based on seismic observations. As a result, we examined 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.