

# 各種Newmark法に基づく鉄道盛土の耐震性評価 — 南海トラフ巨大地震における大阪市街地を例として — Seismic performance evaluation for a railway embankment in Osaka City due to a scenario earthquake with $M_w$ 9.0 along the Nankai Trough

吉川登代子<sup>1</sup>, ○湊文博<sup>1</sup>, 秦吉弥<sup>1</sup>, 山田孝弘<sup>2</sup>, 常田賢一<sup>1</sup>, 飛田哲男<sup>3</sup>  
Toyoko YOSHIKAWA<sup>1</sup>, Fumihito MINATO<sup>1</sup>, Yoshiya HATA<sup>1</sup>,  
Takahiro YAMADA<sup>2</sup>, Ken-ichi TOKIDA<sup>1</sup> and Tetsuo TOBITA<sup>3</sup>

<sup>1</sup>大阪大学 大学院工学研究科

Graduate School of Engineering, Osaka University

<sup>2</sup>西日本旅客鉄道(株) 構造技術室

West Japan Railway Company

<sup>3</sup>京都大学防災研究所 地盤防災解析分野

Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

During a scenario earthquake with  $M_w$ 9.0 along the Nankai Trough, evaluation of residual displacement was carried out in order to estimate damage or non-damage to a railway embankment with half-bank in Konohana Ward, Osaka City, Japan. In particular, first, microtremor measurements were conducted at the site of interest, at nearby permanent station site for strong motion observation and at existing site for ground investigation. Seismic waveforms at the site of interest were then predicted based on the SMGA models considering local site effects. Using various Newmark's sliding block methods, finally, seismic performance of the railway embankment was evaluated. The obtained findings will be useful in future study for improvement of seismic performance of a railway embankment.

**Keywords :** *Newmark's sliding block method, strong motion, residual displacement, railway embankment*

## 1. はじめに

従来、大規模地震時における鉄道盛土の残留変形量の評価は Newmark 法の概念<sup>1)</sup>に基づいており、盛土内における地震応答特性を考慮しない円弧すべりを想定した手法(以下、鉄道総研型 Newmark 法<sup>2)</sup>と呼ぶ)の適用が一般的となっている。しかしながら、高盛土や形状の不規則な盛土では、盛土の地震応答特性の考慮が重要となる。そのため著者ら<sup>3)</sup>は、動的 FEM 解析に基づいて盛土の地震応答特性を考慮することで残留変形量を評価する手法(以下、改良 O 型 Newmark 法<sup>3)</sup>と呼ぶ)を提案している。一方で、道路盛土を主に対象とした設計要領第一集土工編<sup>4)</sup>では、高さ 30m 程度以上の高盛土や不整形地盤上の盛土などにおいては、(鉄道総研型 Newmark 法と同様の手法に)動的 FEM 解析を組合わせた Newmark 法(以下、NEXCO 型 Newmark 法<sup>4)</sup>と呼ぶ)が明示されている。ただし、改良 O 型 Newmark 法と NEXCO 型 Newmark 法の両手法は、表-1 に示すように、その解析方法において複数の相違点を有する。この点に関して著者ほか<sup>5)</sup>は、2011 年東北地方太平洋沖地震によって被災した JR 常磐線牛久駅近くの鉄道盛土に対して、鉄道総研型・NEXCO 型・改良 O 型 Newmark 法をそれぞれ適用し、残留変形量を算定・評価している。ただし、被災盛土地点での推定地震動(一種類の波形のみ)が入力地震動として採用されており、入力地震動のパリエーションが残留変形量の算定・評価に及ぼす影響について検討が行われていない。

一方で、我が国では、現在、2011 年東北地方太平洋沖地震( $M_w$ 9.0)の発生を受け、南海トラフにおいても  $M_w$ 9.0 程度の巨大地震が想定されており(以後、南海トラフ巨大地震と呼ぶ)<sup>6)</sup>、南海トラフ巨大地震に対する鉄道盛

表-1 Newmark 法の型式によるパリエーション

	すべり面の算定方法	入力地震動	すべり円弧の個数
鉄道総研型 Newmark 法	一定の水平震度を外力とした際の臨界すべり面(地震応答を考慮しない)	地表面(法尻相当)における地震加速度波形(地震応答を考慮しない)	1つ(降伏震度最小の円弧)
NEXCO 型 Newmark 法	一定の水平震度を外力とした際の臨界すべり面(地震応答を考慮しない)	等価加速度波形(地震応答を考慮)	複数(降伏震度最小の円弧 + 各小段以上の領域における降伏震度最小の円弧)
改良 O 型 Newmark 法	盛土内の逐次の応答加速度分布を外力とした際の臨界すべり面(地震応答を考慮)	すべり土塊重心における地震加速度波形(地震応答を考慮)	1つ(降伏震度最小の円弧)

土の耐震性評価を実施していくことは非常に重要である。この点に関して、著者ほか<sup>7),8),9)</sup>は、和歌山県田辺市および兵庫県神戸市西区の鉄道盛土を対象に、鉄道盛土の耐震性評価を実施しているが、更に知見を積み重ねていく必要がある。

上述した背景を踏まえ、本稿では、大阪市此花区の鉄道盛土(以後、対象鉄道盛土と呼ぶ)を対象として、盛土の材料特性あるいは基礎地盤特性に関する全てのデータが未明な条件下において、盛土・基礎地盤モデルの設定および入力地震動の設定を行い、そして、鉄道総研型・NEXCO 型・改良 O 型 Newmark 法をそれぞれ適用することで耐震性評価を実施した。具体的には、対象鉄道盛土サイト等において現地踏査および常時微動計測などを行い、その結果に基づいて地盤物性値などを評価した。次に、後述する各種地震動を入力波として、鉄道総研型・NEXCO 型・改良 O 型 Newmark 法を用いて残留変形量を算定した。最後に、得られた算定結果に基づき、採用する入力地震動の違いおよび採用する Newmark 法の型式が残留変形量に及ぼす影響について検討を行った。

## 2. 地盤震動特性の評価

対象鉄道盛土は、**図-1** および**写真-1** に示す大阪市平野区に位置する鉄道盛土(廃線盛土)である。対象鉄道盛土サイトもしくはその極近傍には、強震観測点が存在せず、最も近い既存強震観測点は、MLIT 安治川<sup>10)</sup>となっている(**図-2** 参照)。対象鉄道盛土サイト、MLIT 大和川、周辺の既存ボーリングサイト(中之島 GATE 駐車場)<sup>11)</sup>において常時微動計測を実施した。常時微動 H/V スペクトルの比較を**図-3** に示す。常時微動計測の実施方法および H/V スペクトル算定方法については、文献<sup>12)</sup>を参照されたい。**図-3** に示すように、対象鉄道盛土サイトに対して、MLIT 大和川、周辺の既存ボーリングサイトでの H/V スペクトルの特性が比較的類似している。この類似性を踏まえて、本検討では、以下に示す工学的判断を行った。

- ・ MLIT 安治川での地震観測記録に基づくサイト増幅・位相特性を対象鉄道盛土サイトに転用する。
- ・ 対象鉄道盛土直下の基礎地盤の構成や物性値などについては、周辺の既存ボーリングサイト(中之島 GATE 駐車場)において得られた地盤データを援用する。

**図-4** は、対象鉄道盛土(法尻相当)での常時微動 H/V スペクトルの計測値(**図-3** 参照)と理論値<sup>13)</sup>を比較したものである。理論 H/V スペクトルについては、周辺の既存ボーリングサイト(中之島 GATE 駐車場)での標準貫入試験の際に得られた地層構成に基づき、常時微動 H/V スペクトルの計測値と理論値が良い一致を示すように、各層の密度 $\rho$ やせん断波速度 $V_s$ を試行錯誤により変化させることで設定した。

一方で、盛土内部の初期せん断剛性を決定するためには、対象鉄道盛土の法尻ならびに法尻において微動アレ

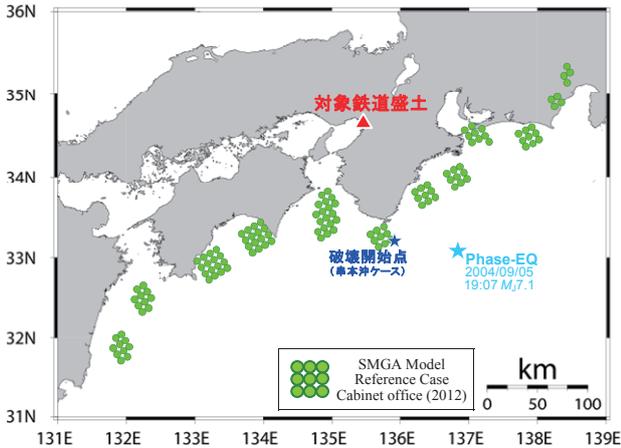


図-1 対象鉄道盛土の位置情報と南海トラフ巨大地震の震源域



写真-1 対象鉄道盛土での現地調査状況(微動計測)の一例

一計測を実施し、得られる盛土内部の伝達関数によって評価する方法<sup>14)</sup>が有効である。そこで本検討では、対象鉄道盛土において微動アレ計測を実施した。アレ計測結果に基づき算定した盛土内部の伝達関数(法尻/法尻)を**図-5** に示す。本稿では、**図-5** に示すように、微動アレ計測結果に基づく伝達関数と、盛土解析モデルにおいてホワイトノイズを入力した際に得られる伝達関数について比較検討を行い、両者のスペクトル特性が概ね類似するように、FEM 解析モデル(後述)の盛土内部における初期せん断剛性 $G_0$ (密度 $\rho$ およびせん断波速度 $V_s$ )を試行錯誤により設定した。



図-2 対象鉄道盛土周辺における既存観測点

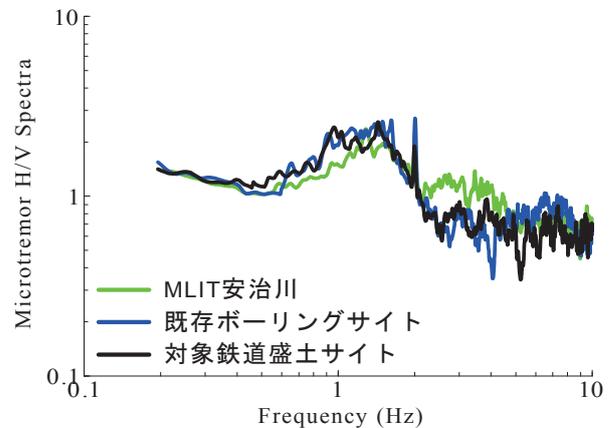


図-3 常時微動 H/V スペクトルの比較

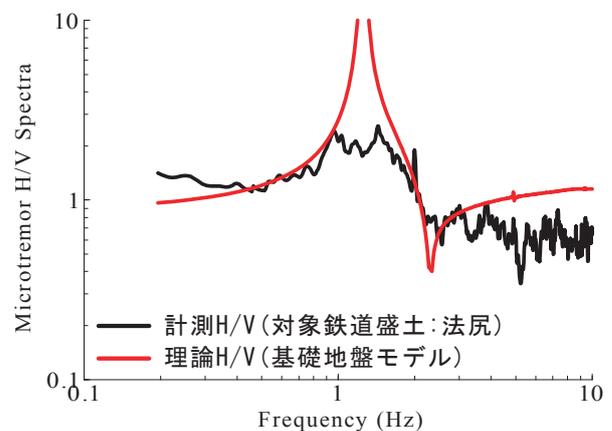


図-4 常時微動 H/V スペクトルによる盛土下の基礎地盤の設定

### 3. 解析モデル

2.により評価した地盤物性値に基づく対象鉄道盛土の解析モデルを図-6 および図-7 に、また解析モデルの入力パラメータの一覧を表-2 にそれぞれ示す。ここに、湿潤単位体積重量 $\gamma$ およびせん断強度定数( $c, \phi$ )については、対象鉄道盛土とその周辺の既存ボーリングサイトでの土質試験結果および鉄道構造物等設計標準・同解説[土構造物編]<sup>15)</sup>などに基きそれぞれ決定した。モデルは鉄道盛土を含めて計7層から成り、構成則は全層にわたり修正R-Oモデルでモデル化した。修正R-Oモデルに用いる動の変形特性( $G/G_0, h \sim \gamma$ 曲線)のフィッティング係数 $R_f, \alpha, \beta$ は、土質性状ごとに安田・山口の提案式<sup>16)</sup>に基づいて評価した。なお、境界条件は初期応力解析において底面を固定支点、側面を鉛直ローラー支点とし、動的解析においては底面および側面ともに粘性境界とした。

### 4. 入力地震動の設定

本検討では、以下の三種類の波形を入力地震動(FEM解析モデル(図-7参照)底面における工学的基盤相当の2E波)として設定した。図-8にその加速度波形を示す。

- ・鉄道構造物等設計標準・同解説[耐震設計編]<sup>17)</sup>の軟弱地盤(常時微動 H/V スペクトルのピーク周波数から G4 地盤と判断)における設計地震動(地表面相当波)を工学的基盤まで引き戻した波形(以後、照査波と呼ぶ)。
- ・南海トラフ巨大地震による推定地震動の一つとして、内閣府から公開されている SMGA モデル(基本ケース)<sup>6)</sup>による推定地震動の対象鉄道盛土位置相当の波形(以後、中防波と呼ぶ)。
- ・南海トラフ巨大地震による推定地震動の一つとして、対象鉄道盛土位置での経験的サイト増幅・位相特性(地盤震動特性(2.参照))を考慮した波形(以後、サイト波と呼ぶ)。

上述したサイト波の設定方法の概要について以下に述べる。まず、地震基盤での地震動を評価し、次に、地震基盤での地震動をフーリエ変換し、振幅に(MLIT 安治川での)サイト増幅特性(地震基盤～工学的基盤)を乗じ、更に、サイト位相特性を評価する 2004 年東海道沖の地震(図-1参照)による(MLIT 安治川での)観測加速度波形(地表での観測波を工学的基盤相当に引き戻した波)を周波数領域で振幅 1 に調整して乗じて、最後に、因果性を考慮したフーリエ逆変換を行った。その際、特性化震源モデルとしては、南海トラフ巨大地震による SMGA モデル(基本ケース)<sup>6)</sup>を採用した。

以上の三種類の地震動を入力波とした動的 FEM 解析(図-6、図-7、表-2 参照)を行い、法尻相当(鉄道総研型 Newmark 法)、すべり土塊重心相当(改良 O 型 Newmark 法)、すべり土塊内等価(NEXCO 型 Newmark 法)の加速度時刻歴を算定した。

### 5. 残留変形量の評価

対象鉄道盛土における残留変形量の解析結果の一覧を表-3 に示す。中防波のケースでは、Newmark 法の型式によらず、有意な残留変位量が発生していない。これに対して、内陸地殻内地震を想定した照査波のケースでは、改良 O 型 Newmark 法と鉄道総研型 Newmark 法による残留変位量がほぼ一致している。一方で、サイト波のケースでは、鉄道総研型 Newmark 法の残留変形量は、改良 O 型 Newmark 法の残留変形量よりも大きく算出される傾向にある。これは、対象鉄道盛土の堤体内において、法尻

からすべり土塊重心にかけての加速度の増幅が比較的小さいためであると考えられる。本検討では、入力地震動のバリエーションによっては、改良 O 型 Newmark 法のほうが残留変形量を小さく算出するケースが確認された。これは、対象鉄道盛土が非常に軟弱な基礎地盤上の盛土であることなどが要因として挙げられる。今後は、これらの要因が残留変形量の評価に及ぼす影響について、更なる検討が必要である。

### 6. まとめ

本稿では、大阪市此花区の市街地にある鉄道盛土を対象サイトとして、現地踏査および常時微動計測の結果などに基づいて盛土および基礎地盤のモデル化を行った。そして、南海トラフ巨大地震による推定地震動および鉄道設計標準による地震動を入力波形とした場合、採用する入力地震動の違いが、鉄道総研型・NEXCO 型・改良 O 型 Newmark 法に基づく残留変形量の算定結果に及ぼす

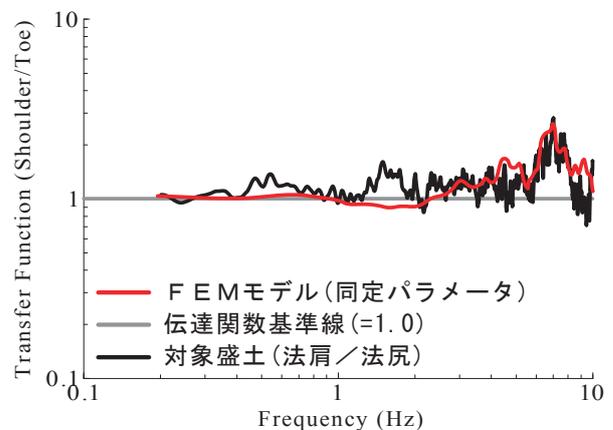


図-5 伝達関数の比較による盛土内の地盤物性値の設定

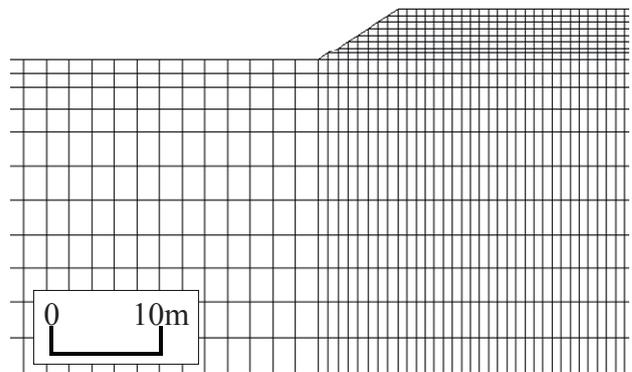


図-6 対象鉄道盛土の FEM モデル

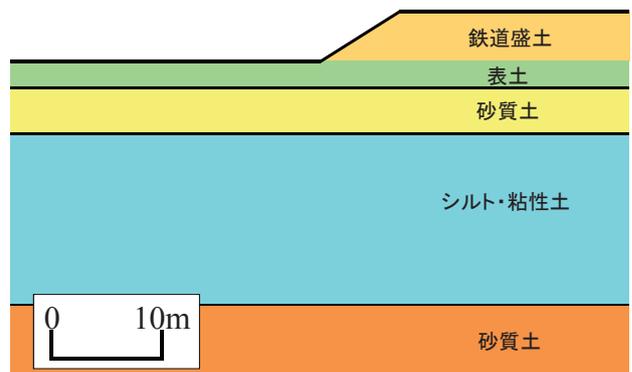


図-7 対象鉄道盛土の土層構造

表-2 盛土および基礎地盤における入力地盤物性値の一覧

土層	せん断弾性係数 $G_0$ (kPa)	湿潤重量 $\gamma_t$ (kN/m <sup>3</sup> )	平均主応力 $\sigma_m$ (kPa)	ポアソン比	粘着力 $c$ (kPa)	内部摩擦角 $\phi$ (deg.)	R- $O_{Rf}$	R- $O_\alpha$	R- $O_\beta$
鉄道盛土	9,364	16.3	20.2	0.33	6	35	6.7	4.45	3.15
表土	24,980	17.0	57.4	0.33	0	35	6.0	4.06	3.02
砂質土	56,204	17.0	102.7	0.33	0	30	4.8	4.06	3.02
シルト・粘性土	15,306	15.0	226.0	0.33	10	15	2.7	4.06	3.02
砂質土	99,918	17.0	366.4	0.33	0	30	4.8	4.06	3.02

表-3 残留変形量の算定結果一覧

	残留変形量 (m)		
	鉄道総研型	NEXCO型	改良O型
照査波	0.01	0.00	0.02
中防波	0.00	0.00	0.01
サイト波	0.13	0.05	0.04

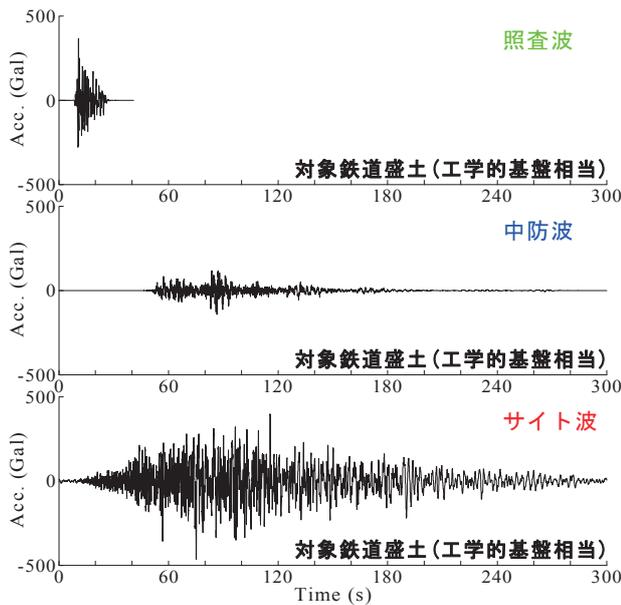


図-8 入力地震動の加速度時刻歴

影響について基礎的な検討を行った。その結果、Newmark法の型式によって算出される残留変形量の値は、採用する入力地震動の特性およびモデル化する基礎地盤の条件などにも依存して有意な差異を示した。

今後は、他サイトの鉄道盛土<sup>18)</sup>に対しても同様の検討を行うことで、得られる知見を積み重ねていきたい。

**謝辞：**対象鉄道盛土サイトでの現地踏査・常時微動計測の際には、大阪市此花区・西区の住民の皆様にお世話になりました。国土交通省強震観測点で得られた波形データを使用させていただきました。(公社)地盤工学会関西支部南海トラフ巨大地震に関する被害予測と防災対策研究委員会の委員の皆様には、本研究の遂行に関して有意義なご意見をいただきました。記して謝意を表します。

**参考文献**

- 1) Newmark, N. M.: Effects of earthquakes on dams and embankments, *Geotechnique*, Vol.15, No.2, pp.139-160, 1965.
- 2) 館山勝, 龍岡文夫, 古関潤一, 堀井克己: 盛土の耐震設計法に関する研究, 鉄道総研報告, Vol.12, No.4, pp.7-12, 1998.
- 3) 例えば, 魚谷真基, 常田賢一, 秦吉弥: 経験地震による無被災実績を考慮した盛土のモデル化および改良O型Newmark法による残留変形量の評価, 土木学会第69回年次学

術講演会講演概要集, III-368, pp.735-736, 2014.

- 4) 東日本高速道路(株), 中日本高速道路(株), 西日本高速道路(株): 設計要領 第一集 土工編, 2009.
- 5) 吉川登代子, 秦吉弥, 常田賢一, 魚谷真基: Newmark法の型式が残留変形量の算定結果に及ぼす影響—2011年東北地方太平洋沖地震によって被災した鉄道盛土での検討事例—, 第54回日本地すべり学会研究発表会講演集, pp.200-201, 2015.
- 6) 南海トラフの巨大地震モデル検討会: 南海トラフの巨大地震モデル検討会(第二次報告), 強震断層モデル編—強震断層モデルと震度分布について—, 内閣府防災情報ホームページ, 2012. (last accessed: 2015/08/16)
- 7) 吉川登代子, 魚谷真基, 秦吉弥, 常田賢一: 南海トラフ巨大地震( $M_w$ 9.0)による土構造物の耐震性評価事例, *Kansai Geo-Symposium 2014 論文集*, 地盤工学会, pp.89-94, 2014.
- 8) 秦吉弥, 吉川登代子, 魚谷真基, 常田賢一, 山田孝弘, 飛田哲男: 盛土構造物の耐震性能照査のために必要な入力地震動の設定に関する一考察, 平成27年度土木学会関西支部年次学術講演会講演概要集, No.0303, 2015.
- 9) 吉川登代子, 魚谷真基, 秦吉弥, 常田賢一, 土井達也, 嶋川純平: 経験地震を考慮した南海トラフ巨大地震による鉄道盛土の残留変形量の評価, 平成27年度土木学会関西支部年次学術講演会講演概要集, No.0302, 2015.
- 10) Uehara, H. and Kusakabe, T.: Observation of strong earth-quake motion by National Institute for Land and Infrastructure Management, *Journal of Japan Association for Earthquake Engineering*, Vol.4, No.3, pp.90-96, 2004.
- 11) 大井昌弘, 藤原広行: 地盤情報の統合化と提供—ジオ・ステーション—, 地盤工学会誌, Vol.61, No.6, pp.8-11, 2013.
- 12) 湊文博, 秦吉弥, 山田雅行, 常田賢一, 魚谷真基: 常時微動H/Vスペクトルに基づく和歌山県本町での地盤震動特性の評価, *Kansai Geo-Symposium 2014 論文集*, pp.95-100, 2014.
- 13) Haskell, N. A.: The dispersion of surface waves on multi-layered media, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.43, No.1, pp.17-34, 1953.
- 14) 秦吉弥, 一井康二, 村田晶, 野津厚, 宮島昌克, 常田賢一: 常時微動計測を利用した道路盛土のせん断波速度の評価—2007年能登半島地震で被災した能登有料道路を例として—, 日本地すべり学会誌, Vol.48, No.6, pp.318-325, 2011.
- 15) (公財)鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説—土構造物編, pp.56-84, 2007.
- 16) 安田進, 山口勇: 種々の不攪乱土における動的変形特性, 第20回土質工学研究発表会, pp.539-542, 1985.
- 17) (公財)鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説—耐震設計編, pp.390-394, 2012.
- 18) 秦吉弥, 吉田武, 吉川登代子, 山田孝弘, 湊文博, 常田賢一, 飛田哲男: 南海トラフ巨大地震におけるJRきのくに線沿いの強震動評価, 地域安全学会梗概集, No.36, 2015. [in this issue]