

令和6年度

一般社団法人日本トンネル技術協会研究助成報告書

助成番号：JTA-R4-奨1

常時微動計測を用いた山岳トンネルの 振動特性の把握に関する研究

令和7年3月31日

河田皓介
東京都立大学

研究概要

目的

山岳トンネルは周辺地山の拘束効果により一般に耐震性が高いとされるが、過去の地震では地質条件が不利な区間や構造上の弱点部で被害が報告されており、トンネル-地山系の動的特性の把握は合理的な耐震評価と維持管理に不可欠である。本研究では、常時微動測定を用いて岩盤トンネルの振動特性を調査し、地山条件とトンネル構造が振動挙動に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。

研究方法

トンネル A（サンプリング周波数 100Hz）とトンネル B（同 500Hz）の代表地点に速度センサーを設置し、人工加振を伴わない常時微動を各約 10 分測定した。トンネル B ではインバート設置前後に 3 回（支保工 No.1345・No.1364・No.1492）の繰り返し測定を実施。トレンド除去・フィルタリング後、フーリエスペクトルで卓越周波数を、H/V スペクトル比で増幅特性を評価した。トンネル変形挙動の評価に最も代表性の高い横断方向（X 方向）の結果を用いた。

調査・実験等の結果

- (1) 増幅は限定的： トンネル内の振動振幅は外側の約 1/10（外側 約 0.001～0.002mm/s，内側 約 0.0001mm/s）で、トンネル内での増幅効果は小さい。
- (2) 構造物のないトンネル A： 明確な卓越周波数ピークは認められず、スペクトル特性は地点により変化。トンネル内の H/V 比には 1～3Hz 付近にピーク。
- (3) 構造条件の差（トンネル B）： 支保工のみの区間ではスペクトル振幅が大きく広い周波数帯に分布して不安定なのに対し、覆工・インバート設置区間では振幅が減少し分布が安定・平滑化。
- (4) インバート設置の効果： 同一地点の設置前後比較で、設置後に振動振幅が減少し H/V スペクトル比が滑らかになる傾向が複数地点で一貫して確認された（構造剛性の向上を反映）。

結論

卓越振動数は主に周辺地山の剛性に支配され、振動振幅とスペクトルの安定性はトンネル構造条件の影響を強く受けることが明らかとなった。特にインバート設置による振動振幅の減少とスペクトル特性の安定化が確認された。本手法はトンネル挙動の合理的評価と、耐震評価・維持管理への応用に貢献することが期待される。

今後の課題

岩盤トンネルでは振幅が小さくスペクトル特性が不明瞭になり得るため、常時微動データの解釈では地山の影響と構造物の影響を区別することが重要である。今後は、異なる地質・構造条件での継続的な測定による評価信頼性の向上が課題である。

東京都立大学・河田皓介
東京都立大学・砂金伸治

目次

第I章 はじめに（研究背景と目的）	1
第II章 既往の研究と本研究の位置づけ	2
2.1 常時微動測定による動的特性評価	2
2.2 岩盤トンネルへの適用と課題	2
2.3 本研究の新規性	2
第III章 対象トンネルと地質条件	3
3.1 トンネル A	3
3.2 トンネル B	3
第IV章 測定・解析方法	4
4.1 測定概要	4
4.2 測定位置と構造条件	4
4.3 解析手法	5
4.4 評価に用いる測定方向	5
第V章 測定結果	6
5.1 トンネル A の測定結果	6
5.2 トンネル B の測定結果（構造条件による比較）	7
5.3 インバート設置前後の比較	10
第VI章 考察（振動特性の支配要因）	11
6.1 卓越周波数の支配要因	11
6.2 地山の効果と構造効果の区別の重要性	11
6.3 実務への示唆	11
第VII章 結論と今後の課題	12
7.1 結論	12
7.2 今後の課題	12
参考文献	13

第 I 章 はじめに（研究背景と目的）

山岳トンネルは、比較的良好な岩盤の中に構築されるため、一般的に地震に強い構造物と考えられてきた。しかしながら、2004 年の新潟県中越地震や 2016 年の熊本地震、2024 年の能登半島地震など内陸部での規模の大きな地震においては、覆工崩落等の大規模な被害が生じた。それらを踏まえ、既往研究^{1) 2)}では、地震被害は坑口部等の地質不良個所や施工時に不具合のあった個所などで顕著に生じることが明らかになっており、実際の被害事例³⁾からも確認されている。しかし、地震時挙動やそれに基づく設計手法が確立されているとは言い難く、昨今では特に既設トンネルへの対策も求められており、山岳トンネルの地震時挙動を正確に把握することは重要であると考えられる。

山岳トンネルで避けるべき地震被害の種類の一つは、覆工コンクリートの崩落である。これらの被害が生じる要因の一つとして地山と覆工が防水シート等で縁切りされていることが挙げられる。これにより地震時に地山と覆工が一体となって挙動せず、覆工に過大な外力が生じる可能性が考えられる。そのため、本研究では地震時の地山と覆工の挙動の違いに着目するために、地山の振動特性を把握する手法である常時微動計測を用いて実際の施工中のトンネルにおいて計測を行うことで、トンネルの地震時挙動に影響を及ぼすと考えられる振動特性を地山条件や構造条件の違いから把握する。さらに、山岳トンネルにおける常時微動計測手法の有用性を明らかにすることを目的とする。

第Ⅱ章 既往の研究と本研究の位置づけ

2.1 常時微動測定による動的特性評価

常時微動の H/V スペクトル比（水平動と上下動のフーリエスペクトル比）は、地山の卓越周期・増幅特性を簡便に評価できる手法として、土質地山のサイト特性評価に広く活用されている⁴⁾。また、フーリエスペクトルによる卓越周波数の同定は、構造物の動的特性評価にも適用されてきた⁵⁾。これらの手法は、非破壊かつ省力化できるという利点から、構造物の維持管理にも有効とされている^{6)~8)}。

2.2 岩盤トンネルへの適用と課題

一方、岩盤トンネルへの常時微動測定の適用は限定的である⁹⁾。これは、岩盤の振動振幅が土質地山に比べて小さくノイズとの区別が難しいこと、またトンネルの応答が周辺地山と構造物の相互作用により複雑化することなどが背景にある。さらに、既存研究の多くは、地山条件の評価または構造物の応答評価のいずれかを独立に扱っており、地質条件と構造条件がトンネル振動特性に及ぼす複合的な影響は十分に解明されていない。

2.3 本研究の新規性

本研究は、地質条件の異なる 2 つのトンネルを対象とすることに加え、同一トンネル内で構造条件の異なる区間（支保工のみ／覆工・インバート設置）を併せて調査し、さらにインバート設置前後の繰り返し測定を実施している点に特色がある。これにより、地山条件の影響と構造条件の影響を分離して評価することが可能となると考えられる。

第Ⅲ章 対象トンネルと地質条件

3.1 トンネル A

図 3.1 にトンネル A の地質縦断図を示す。トンネル A は、和歌山県内に位置する山岳トンネルである。計測時には、トンネルは貫通済みであり、一部インバートが施工されていたが、覆工は未設置であった。トンネルは古第三紀の付加体を構成する堆積岩中に掘削されており、砂岩と泥岩の互層を主体とする。計測対象とした周辺地山は、剛性が比較的低い軟岩に区分される。このトンネルでは、一次支保の状態かつ、インバートの設置された区間の計測を行った。

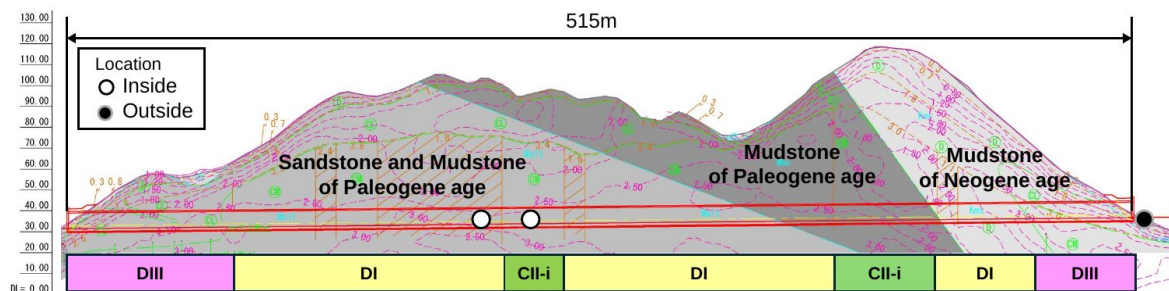


図 3.1 トンネル A の地質縦断図と測定位置

3.2 トンネル B

図 3.2 にトンネル B の地質縦断図および計測位置を示す。トンネル B は日本中部の山岳地帯に位置し、現在施工中である。トンネルの地質は、後期中新世の砂岩・泥岩互層ならびに凝灰角礫岩-泥岩互層を主体としている。計測対象区間の周辺地山は、中硬～軟岩に区分され、中程度の剛性を有し、局所的に不均質な特徴を示す。

このトンネルでは、施工進捗に応じて軸方向に複数の構造条件が存在する。すなわち、支保工のみが設置された区間、覆工が設置された区間、インバートまで設置済みの区間が混在している。一部の区間ではインバートが未設置であるが、最終設計ではトンネル全線にインバートが設置される計画である。これらの異なる地質条件・構造条件は、地山条件と構造剛性が岩盤トンネルの振動特性に及ぼす影響を体系的に検討するための有用な対象となる。

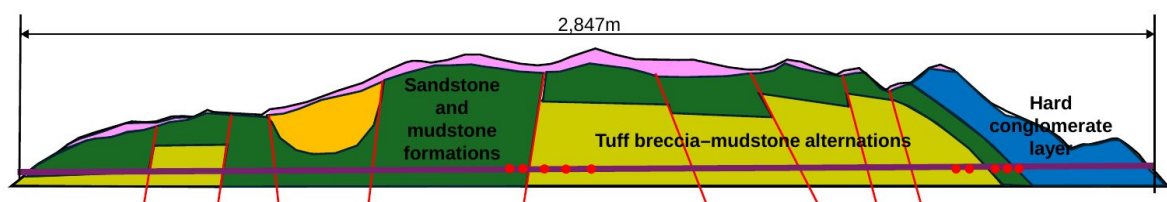


図 3.2 トンネル B の地質縦断図と測定位置

第Ⅳ章 測定・解析方法

4.1 測定概要

常時微動測定は、トンネル A およびトンネル B のそれぞれの代表的な測定位置において、トンネル断面内に速度センサーを設置して実施した（図 4.1）。測定は人工加振を伴わない常時微動状態で行い、サンプリング周波数はトンネル A で 100Hz、トンネル B で 500Hz、各測定の記録時間は約 10 分とした。トンネル A では、周辺岩盤の固有振動数が 10Hz より高いと想定し、それに応じてサンプリング周波数を設定した。一方、トンネル B では予備観測で明確な卓越周波数ピークが認められなかったため、より高い 500Hz を採用し、広い周波数範囲を捕捉して周波数特性を確実に同定できるようにした。これは周波数解析のナイキスト条件に整合するものである。

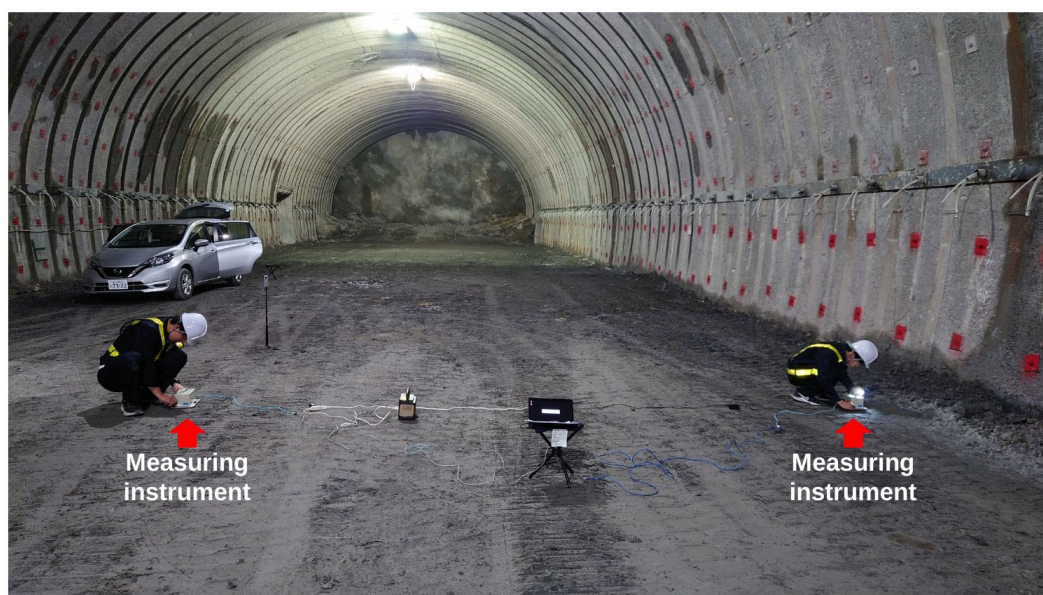


図 4.1 トンネル A における常時微動測定（例）

4.2 測定位置と構造条件

測定位置は、トンネル軸方向の異なる地質条件・構造条件を代表するように選定した。トンネル A の測定位置を表 4.1 に、トンネル B の測定位置を表 4.2 に示す。

トンネル B では、選択した測定位置（支保工 No.1345, No.1364, No.1492）において、インバート設置前に 2 回、設置後に 1 回の計 3 回の測定を異なる施工段階で実施した。

表 4.1 トンネル A の測定地点と地質・構造条件

測定地点	地質条件	構造条件
トンネル外	崖錐堆積物（Talus deposit）	なし
支保工 No.250	砂岩-泥岩互層（古第三紀付加体）	支保工
支保工 No.300	砂岩-泥岩互層（古第三紀付加体）	支保工

表 4.2 トンネル B の測定地点と地質・構造条件

測定地点	地質条件	構造条件
覆工ブロック 31	硬質礫岩層	覆工+インバート
覆工ブロック 33	砂岩・泥岩層	覆工+インバート
覆工ブロック 36	砂岩・泥岩層	覆工+インバート
覆工ブロック 41	凝灰角礫岩-泥岩互層	覆工+インバート
覆工ブロック 45	凝灰角礫岩-泥岩互層	覆工+インバート
支保工 No.1345	凝灰角礫岩-泥岩互層	支保工 (+インバート)
支保工 No.1492	凝灰角礫岩-泥岩互層	支保工 (+インバート)
支保工 No.1636	砂岩・泥岩層	支保工
支保工 No.1655	砂岩・泥岩層	支保工

4.3 解析手法

測定で得られた速度時刻歴に対して、トレンドの除去とノイズ成分除去のためのフィルタリングを施した後、各測定位置のフーリエスペクトルを算出し、スペクトル振幅のピークから卓越周波数を求めた。さらに、増幅特性の評価と卓越周波数の確認のため、水平動と上下動のフーリエスペクトル比である H/V スペクトル比を算出した。これらの結果を用いて測定位置間の振動特性を比較し、地質条件・構造条件がトンネルの動的挙動に及ぼす影響を検討した。

4.4 評価に用いる測定方向

本研究においては、計測をトンネル横断方向 (X)、縦断方向 (Y)、鉛直方向 (Z) の 3 方向で実施した。本報告書では、トンネルの変形挙動を評価するうえで最も代表性が高いと考えられる横断方向 (X 方向) の結果について整理した。

第V章 測定結果

5.1 トンネル A の測定結果

図 5.1 にトンネル A の速度時刻歴 (X 方向) を図 5.2 に H/V スペクトル比を示す。速度時刻歴から、トンネル内の振幅がトンネル外の振幅に比べて著しく小さいことが分かる。トンネル外の最大振動速度が約 $0.001\sim0.002\text{mm/s}$ であるのに対し、トンネル内では約 0.0001mm/s 程度であり、外側の振幅の約 $1/10$ に相当する。波形は全般的にランダムであり、明確な卓越周期の運動は認められない。

H/V スペクトル比では、トンネル外では $15\sim20\text{Hz}$ 付近にピークが現れるが、これは排水ポンプの運転などの人工起振源の影響と考えられる。一方、トンネル内では側壁・トンネル中央のいずれにおいても $1\sim3\text{Hz}$ 付近にピークが認められた。 10Hz を超える高周波数域ではスペクトル特性が測定位置により変化し、ランダムなピークを示す区間がある一方、特にトンネル中央ではスペクトル比が 1 に近い区間も見られた。

以上より、トンネル内の振動特性は周辺地山条件と構造形状の両方の影響を受けていることが示唆される。

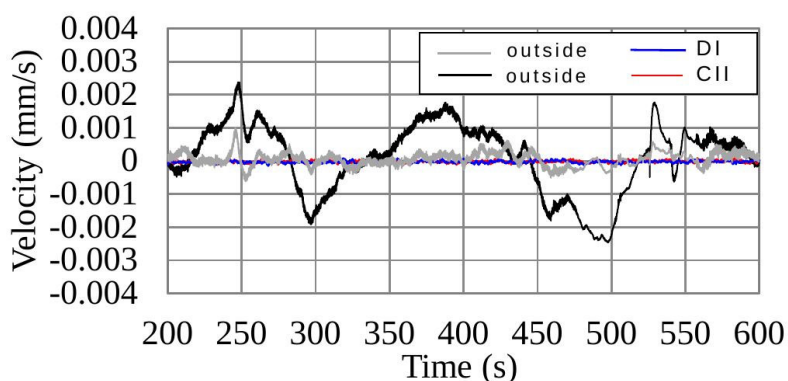


図 5.1 トンネル A の速度時刻歴 (X 方向)

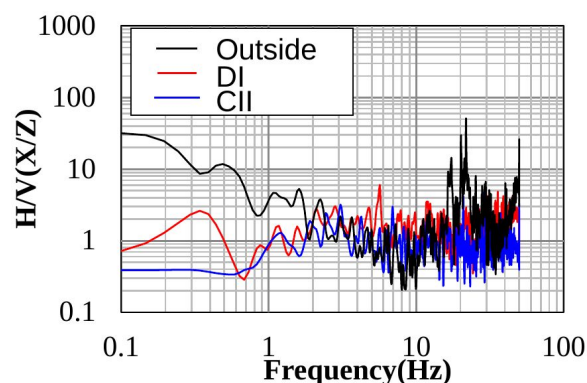


図 5.2 H/V スペクトル比

5.2 トンネル B の測定結果（構造条件による比較）

図 5.3 に支保工のみの区間のフーリエスペクトルを、図 5.4 に H/V スペクトル比を示す。また、図 5.5 に覆工打設後のフーリエスペクトルを、図 5.6 に H/V スペクトル比を示す。

フーリエスペクトルに関して、支保工のみの設置された区間では、振幅が比較的大きく、広い周波数帯域に分布する傾向が認められる。また、明確な卓越ピークは一貫して観測されず、スペクトルの形状は測定位置によって変化した。これに対し、覆工とインバートが設置された区間では、振幅が全般的に減少し、分布がより安定する傾向が認められた。明瞭なピークが常に観測されるわけではないが、支保工のみの状態と比較するとスペクトルのばらつきは低減している。

H/V スペクトル比もフーリエスペクトルと同様に支保工のみの場合と覆工打設後の施工段階による差異が認められる。支保工のみの状態ではスペクトル比の変動が大きいのに対し、覆工・インバートの状態ではスペクトルが相対的に平滑で安定した形状となる。

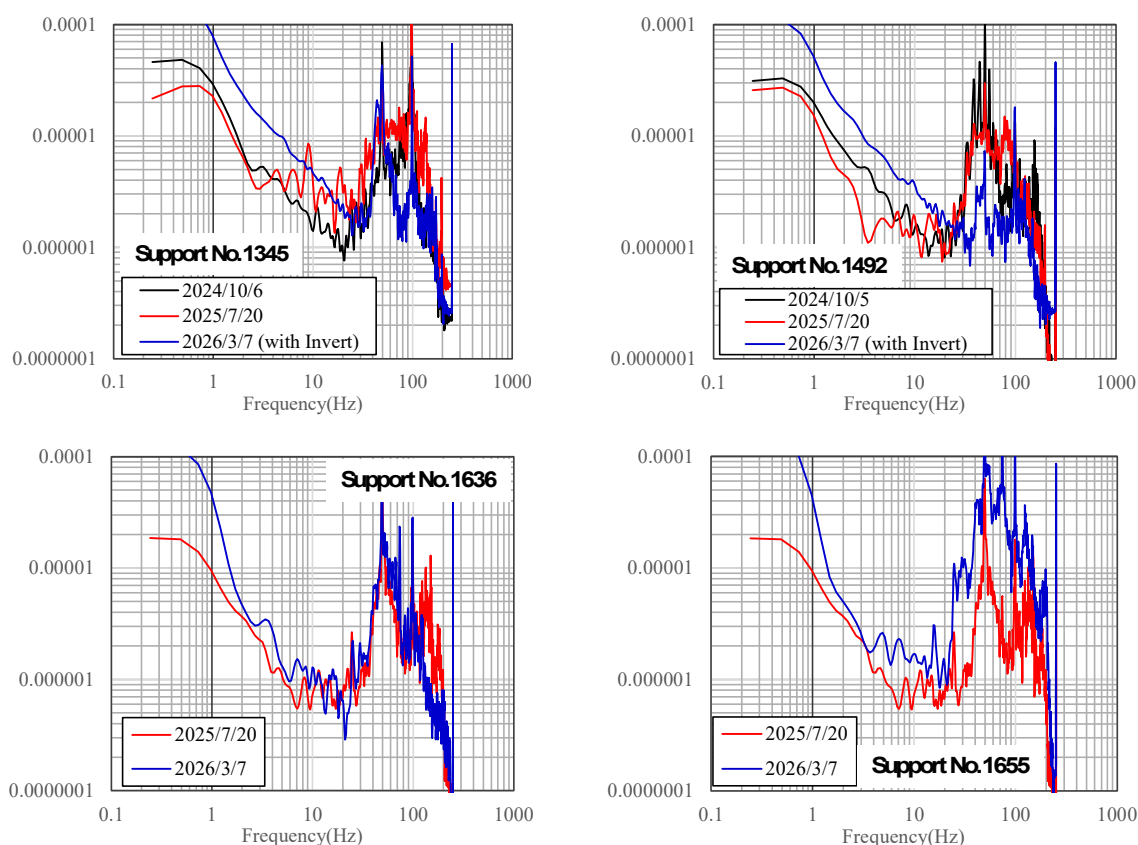


図 5.3 トンネル B のフーリエスペクトル（支保工区間）

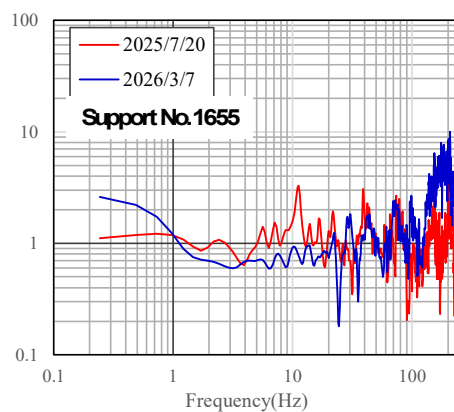
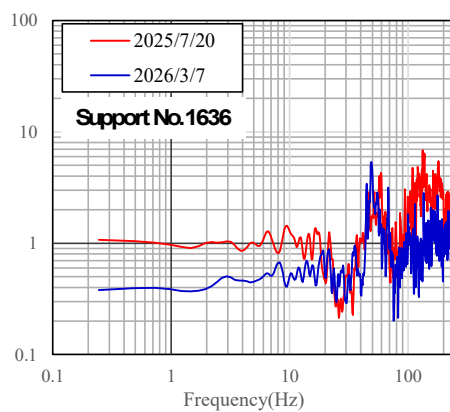
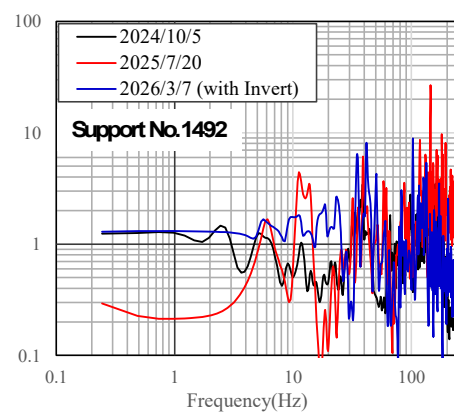
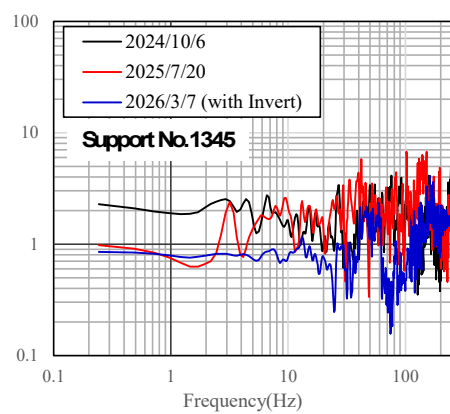


図 5.4 トンネル B の H/V スペクトル (支保工区間)

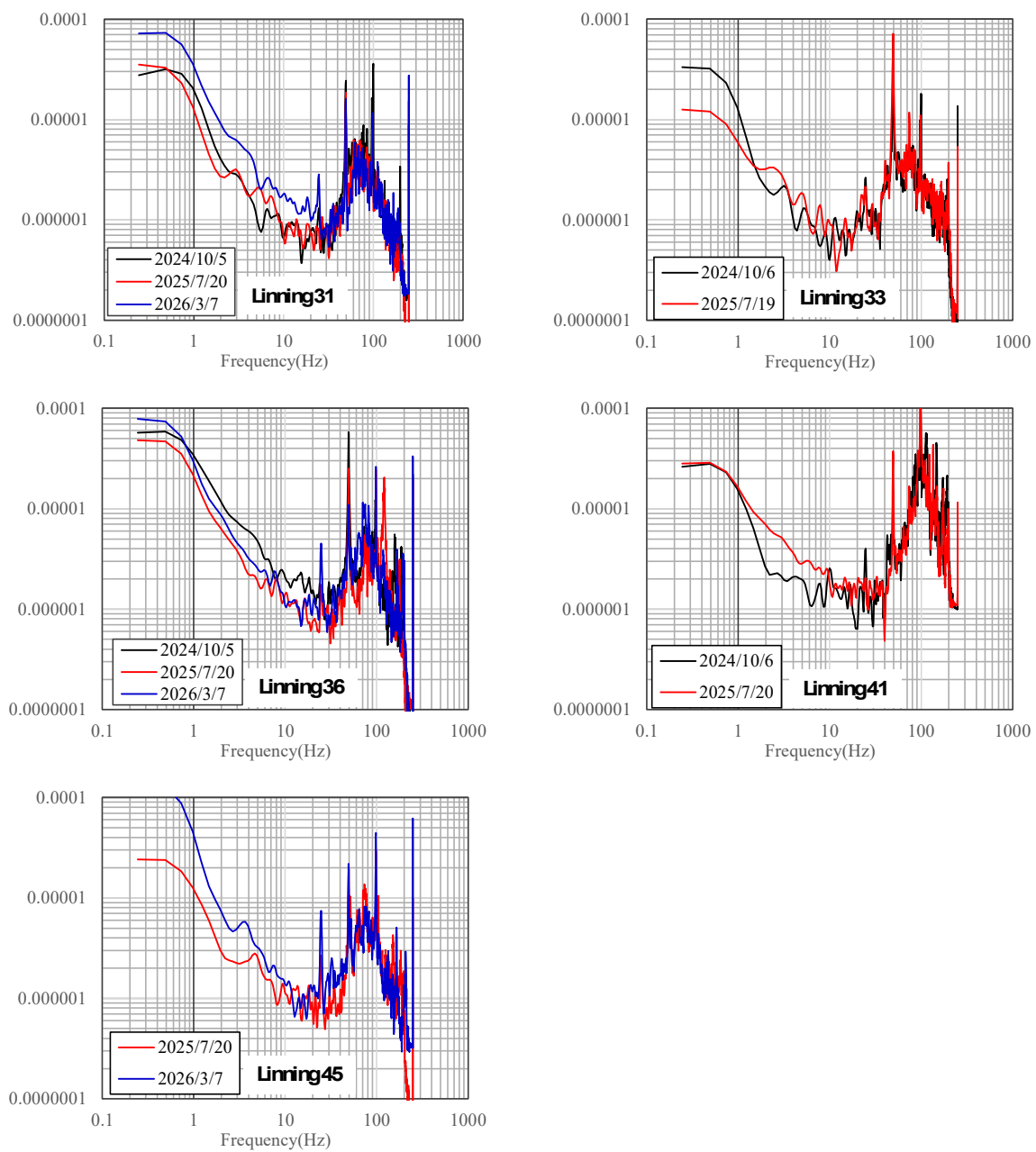


図 5.5 トンネル B のフーリエスペクトル (覆工区間)

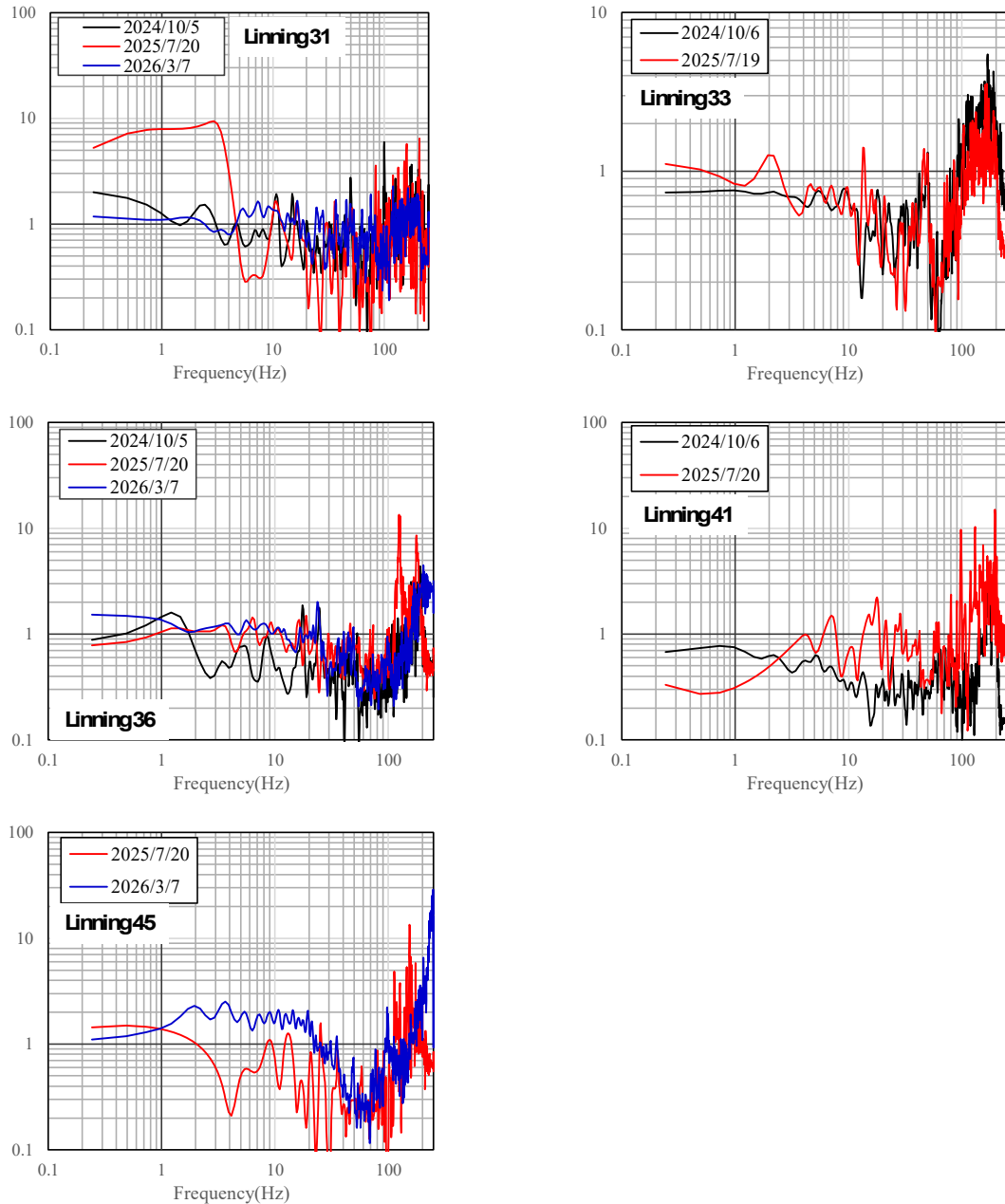


図 5.6 トンネル B の H/V スペクトル（覆工区間）

5.3 インバート設置前後の比較

支保工のみの状態ケースの一部，支保工 No.1345 および No.1492 においては，インバート設置前後で計測を実施した．2025 年 7 月 20 日以前は支保工のみの状態であったが 2026 年 3 月 7 日の計測では覆工は打設されていないものの，インバートが設置されていた．この，インバート設置前後を比較すると，振動振幅が減少していることが確認された．この傾向は複数の測定位置で一貫して認められた．これらの結果は，インバート設置後のスペクトル振幅の減少がトンネルの構造体において剛性が向上したものと考えられる．一方で卓越周波数への影響は地山条件の影響に比べて限定的であることを示している．

第VI章 考察（振動特性の支配要因）

6.1 卓越周波数の支配要因

トンネル A およびトンネル B の結果を総合すると、岩盤中のトンネルの振動特性には地山条件と構造条件の双方が影響をおよぼしていると考えられる。卓越振動数は主に周辺地山の剛性によって支配され、振動振幅とスペクトルの安定性はトンネルの構造条件に強く影響される。この区別は、トンネル B のインバート設置後に観測された振動振幅の減少により裏付けられる可能性がある。

すなわち、構造条件の変化は振幅とスペクトル形状に現れやすく、卓越周波数の移動としては現れにくいことが示された。

6.2 地山の効果と構造効果の区別の重要性

岩盤中のトンネルでは観測される振動振幅が小さく、明瞭なスペクトル特性が現れる地盤とは異なり、不明瞭になりがちである。したがって、常時微動観測のデータを解釈する際には、地山条件による影響と構造条件による影響を区別して評価することが不可欠である。特に、構造物の状態変化を検出しようとする場合には、測定位置の地山特性（卓越周波数）を先に把握し、その上でスペクトルの振幅や形状の変化を構造条件の変化と関連付けて評価する手順が有効と考えられる。具体的には支保工の状態、つまり地山の特性を把握したうえで覆工を設置した（構造を考慮した）状態での計測により地山と構造とを分けて評価することができると考えられる。

6.3 実務への示唆

同一測点での経時的な繰り返し測定は、構造の変化による剛性の変化を捉える有効な指標となり得る。常時微動測定による振幅・スペクトル安定性の評価を施工時から維持管理まで引き続いて行うことで、構造の変化をとらえることができる可能性があり、トンネル構造の劣化等の維持管理への応用が期待できる。

第Ⅶ章 結論と今後の課題

7.1 結論

本研究では、常時微動観測を用いて岩盤中のトンネルの振動特性を調査し、地山条件と構造条件の影響を検討した。得られた結論は以下のとおりである。

- 1) トンネル内の振動振幅はトンネル外の 1/10 程度であり、トンネル内での増幅効果は一般に限定的である。
- 2) 卓越振動数は主に周辺地山の剛性に支配され、振動振幅とスペクトルの安定性はトンネル構造条件に強く影響される。
- 3) 同一測点での繰り返し測定により、インバート構造の設置が振動振幅の減少とスペクトル特性の安定化をもたらすことが示された。
- 4) 岩盤トンネルにおける常時微動データの解釈では、地山条件の影響と構造条件の影響を区別することが重要である。

本アプローチは、トンネル挙動の合理的評価に寄与し、耐震評価および維持管理への応用が期待される。

7.2 今後の課題

今後は、異なる地山条件・構造条件下での継続的な測定を実施し、常時微動に基づく評価手法の信頼性を向上させるとともに、地質・構造要因がトンネル振動特性に及ぼす影響をさらに明確化することが課題である。

参考文献

- 1) 河田皓介, 日下敦, 砂金伸治, 真下英人; 地層境界に位置する山岳トンネルの破壊状況を模型振動実験により検証, トンネル工学報告書, 第 24 巻, I -30, 2014.12
- 2) 日下敦, 砂金伸治, 北川洋平, 河田皓介, 原翔平; 山岳トンネルの地震時挙動に関する実際現場での計測結果に基づく検証, 土木学会論文集 F1, 74 巻 2 号, 土木学会, Vol.44, pp.I_1-I_17, 2018
- 3) 砂金伸治, 小出孝明, 日下敦, 吉岡知哉, 岸田展明; 山岳トンネルの地震時挙動と耐震対策に関する研究報告書, 土木研究所資料, 4358 巻, pp., 2027
- 4) Nakamura, Y.: A Method for Dynamic Characteristics Estimation of Subsurface Using Microtremor on the Ground Surface, Quarterly Report of RTRI, Vol.30, No.1, pp.25-33, 1989.
- 5) Brownjohn, J.M.W., Magalhaes, F., Caetano, E., Cunha, A.: Ambient Vibration Re-testing and Operational Modal Analysis of the Humber Bridge, Engineering Structures, 2010.
- 6) Molnar, S. et al.: A Review of the Microtremor Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio (MHVSR) Method, 2022.
- 7) SESAME: Guidelines for the Implementation of the H/V Spectral Ratio Technique on Ambient Vibrations: Measurements, Processing and Interpretation, European Commission, 2004.
- 8) 栗田哲史, 松本陽介, 中野靖, 恒川明伸, 黒瀬高秀: 常時微動計測による重力式コンクリートダムの振動特性把握に関する検討, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.76, No.4, pp.I_137-, 2020.
- 9) 高陽, 蔣宇静, 李博, 杉本知史, 吉田慎平: 固有振動特性に基づくトンネル覆工の健全性評価に関する研究, 土木学会第 67 回年次学術講演会講演概要集, pp.217-218, 2012.