

鉄 道 総 研 報 告

第39巻 第7号

2025年7月

論文

- 車両** 車載型潤滑油状態監視システムによるエンジンの状態診断
..... 鈴木淳一，木川定之，生駒一樹，高重達郎（1）
- 施設** 地盤と構造物の非線形化が応答変位法に用いる慣性力と地盤変位の組合せに及ぼす影響
..... 田中仁規，坂井公俊（9）
- 施設** 耐震設計上の基盤面と表層地盤の相互作用が卓越周期に与える影響
..... 坂井公俊（19）
- 運転** ダイヤ乱れ時にも利用可能な列車混雑区分予測モデルの実装と検証
..... 上田寛人，中挾晃介，國松武俊（27）

技術報告

- 施設** トンネル壁面画像を用いた健全度自動判定・要注意箇所投影技術の開発
..... 仲山貴司，山下雄大，野城一栄（33）

車載型潤滑油状態監視システムによるエンジンの状態診断

鈴木 淳一* 木川 定之* 生駒 一樹* 高重 達郎**

Diagnosis of Engine Condition with an Oil Condition Monitoring System

Junichi SUZUMURA Sadayuki KIKAWA Kazuki IKOMA Tatsuro TAKASHIGE

The authors have developed an on-board lubricating oil condition monitoring system, for diesel-powered vehicle, consisting of an oil analyzer and a data logger capable of communicating with an external terminal via Wi-Fi. The performance of the system was evaluated using a bench test which artificially simulates internal engine wear and an on-track test using a commercial vehicle. The results of the tests showed that the monitoring system operated normally and was able to detect an increase in the concentration of iron powder in the engine oil.

キーワード：潤滑油，潤滑油センサ，状態監視，摩耗粉，エンジン油，ディーゼルエンジン

1. はじめに

走行中の車両において、エンジンや変速機のような駆動用機器に使われている、軸受等のしゅう動部品に異常摩耗や焼付き等の損傷が発生すると、機器の異常により重大な事故や輸送障害につながる可能性がある。これらの損傷の兆候を検知し、営業線での機器の異常発生を未然に防止する手段として、摩耗により発生して潤滑油（以下、「油」）に混入した鉄等の金属粉の濃度を、発光分光分析装置等を用いて測定する方法等が採用されている¹⁾。しかし、現在使用されている分析装置は大型で高価なため、分析装置を配備できる箇所が拠点となる工場に限定されている。そのため、車両所等の区所で採取した油を拠点工場まで輸送する必要がある、迅速な異常診断を行うことや測定頻度を増やすことが難しいという課題がある。また、現在の方法は分析装置の操作やデータ解析にある程度の習熟が必要であり、分析装置を扱える社員が限定される。そこで、検修業務効率化および技術継承の観点から、より低コストで迅速に、かつ簡便な分析操作で油分析を行える装置の開発が求められていた。

このような課題に対し、鉄道総研では過去に、エンジンや変速機等の油分析による異常診断に適用可能な、取り扱いが容易で十分な精度を有する分析装置（以下、「定置型分析装置」）を開発した²⁾。定置型分析装置では、機器の給油口や検油栓等にチューブを挿入して、装置に内蔵されているポンプで吸入した油を、鉄粉濃度を測定できるセンサ（以下、「潤滑油センサ」または「センサ」）に導入した後、その油を給油口等から機器に戻すことで、容器に採油せずに油の鉄粉濃度を測定できる。

定置型分析装置は、交番検査（月検査）等における機

器の異常診断への適用を想定しているが、さらに分析頻度を増やすことは、現場の作業量を考慮すると容易ではない。そこで、定置型分析装置を用いる場合よりも機器の異常診断の頻度を容易に増やし、異常の早期検知を実現することを目的として、駆動用機器の状態を、潤滑油センサを利用して車上から監視するシステム（以下、「状態監視システム」）の導入を検討した。状態監視システムを用いることで、仕業検査時や車両運用中等の任意のタイミングで機器の状態診断を行うことができる。また、状態監視システムを、機器内部の状態に応じて検修を行う状態監視保全（Condition Based Maintenance: CBM）に活用することで、解体を伴う大掛かりな検査の周期を延伸することにより、車両検修の省力化および低コスト化を図れる可能性が期待できる。

本研究では、潤滑油センサを利用した駆動用機器の状態監視システムを営業車両に適用するために、機器近傍に設置可能な分析装置（以下、「車載型分析装置」）を試作し、データ転送方法の検討、およびエンジン台上試験と現車試験による状態監視システムの性能評価を実施した。以下にその結果を報告する。

2. 車載型分析装置の試作

営業車両のエンジン近傍への設置を考慮して潤滑油センサとポンプを組み込んだ車載型分析装置を試作した。図1に試作した装置の外観を示す。本装置は定置型分析装置と同様の原理で測定する潤滑油センサを内部に有し、エンジンの給油口や排油栓等から装置内部に導入した油の鉄粉濃度を、0～200ppmの範囲で前処理なしに測定できる。測定後の油は再びエンジンのオイルパン等に戻す構造としている。

表1に車載型分析装置の主な仕様を示す。定置型分析装置から変更した点は以下のとおりである。

* 材料技術研究部 潤滑材料研究室
** 車両技術研究部 駆動システム研究室

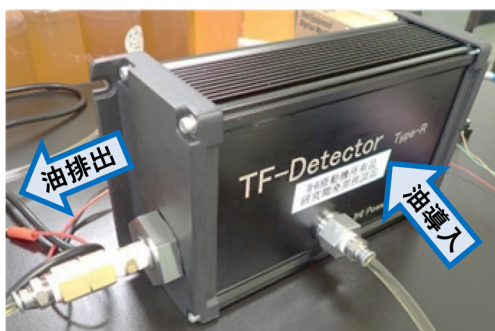


図 1 車載型分析装置の外観

表 1 車載型分析装置の主な仕様

電源	DC24V, 最大 2A
サイズ・質量	300×160×40mm, 約 5.3kg
測定範囲・出力	鉄粉濃度 0～200ppm に対し出力電流 4～20mA
計測分解能	±3ppm (繰り返し分解能)
ポンプ容量	0.5～3mL/s (試料油粘度, 配管路による)
試料油動粘度	20～2000mm ² /s
試料油温度	0～80℃

(1) 測定部にポンプ機能を持たせることによる小型化
定置型分析装置では、油を循環させるためのポンプを有しているため、ポンプが装置内のスペースの多くを占めている。これに対し、車載型分析装置では、測定部に設置されているモータを用いて、小型のロータリーポンプを駆動することで油を吸引する機構を採用し、大幅な小型軽量化を実現した。

(2) 制御装置、表示・記録装置の省略

定置型分析装置では、測定結果（鉄粉濃度）の表示・記録、および装置の制御のため、制御装置およびタッチパネルを搭載している。これに対し、車載型分析装置では、電源投入時は常時油吸引および測定を実施することとして制御装置を省略した。また、表示・記録装置も省略して、鉄粉濃度に対応したセンサからの電流値を出力することで、本体を小型化している。電流値は、任意の表示器およびデータロガー等で、鉄粉濃度として表示・記録可能である。

(3) DC24V での駆動

定置型分析装置では駆動用電源を AC100V としている。これに対し、車載型分析装置では、車両の床下で使用されることを想定し、電源を一般型気動車で広く使われている DC24V とした。なお、電源電圧が異なる車両（DC100V 等）の場合は、装置仕様は変更せず、DC/DC コンバータを設置することにより対応できる。

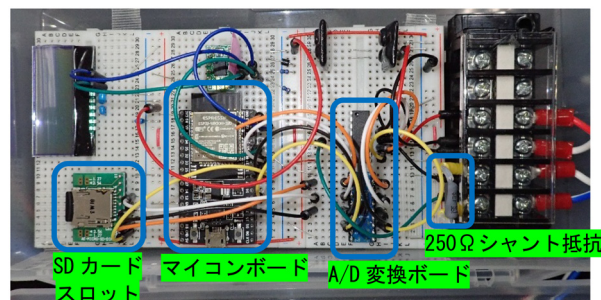


図 2 車載型分析装置の外観

3. データ転送方法の検討

2 章で述べたように、試作した車載型分析装置では、小型化およびコスト低減を目的として測定値の表示・記録装置を省略しているため、別途データロガー等の外部機器を用いて測定値を表示・記録する必要がある。そこで、Wi-Fi によるデータ通信を用いてタブレット端末やスマートフォン等の任意の端末で測定値の閲覧およびデータのダウンロードを可能とする記録装置を試作した。

ここでデータ通信方法として Wi-Fi を適用した理由は以下のとおりである。

- ①汎用的な技術であり、低コストで導入できる。
- ②無線法等の関係法令の規制対象外である。
- ③タブレット端末やスマートフォン等、乗務員や検修社員に貸与されている外部端末が利用可能であり、導入の際の追加コストを低減できる。
- ④出区点検時における検修車庫や留置線等での状態診断や、車両運用中の異常確認時における乗務員によるエンジン近傍での状態診断では、必要なデータ通信距離は最大で 20m 程度と考えられ、Wi-Fi であればこの通信距離に十分対応している。

図 2 に試作した記録装置の回路構成を示す。電源は車載型分析装置本体と同じく DC24V である。装置からの出力は以下の要領で記録される。

- ①装置からの出力電流（4～20mA）を 250Ω ショント抵抗により電圧（1～5V）に変換する。
- ② A/D 変換ボード（MCP3208）にて出力電圧をデジタル信号に変換する。
- ③出力電圧を、測定日時とともに、テキストファイル形式で microSD カードに記録する。

記録装置では、A/D 変換ボード等を制御するマイコンとして、Wi-Fi 通信機能を備えたもの（ESP32-WROOM-32E マイコンボード）を使用している。外部端末から記録装置のアクセスポイントにアクセスし、パスワードを入力すると、ブラウザにより測定値の表示、記録装置の制御（時刻合わせ、測定間隔の変更、出力電圧から鉄粉濃度への換算式の設定、microSD カードに保存された

データのダウンロード等)が可能なページを閲覧できる。

エンジン油の鉄粉濃度では、振動加速度のような急激な変化は発生しにくいと考えられるため、現段階では出区検査時等の決まったタイミング、または車両運用中における異音や排気異常等の異常発生時等にデータを確認するような運用を想定して、状態監視システムの開発を進めている。記録装置からのデータ取得についても、検修社員や乗務員が必要に応じて手持ちの端末等にデータを表示、およびダウンロードする形態としている。

ただし、車載型分析装置では電源が投入されている間は常時測定を行っているため、リアルタイムの測定値を運転台等に表示することも可能である。

4. エンジン台上試験による性能評価

2章で述べた車載型分析装置と3章で述べた記録装置で構成される状態監視システムについて、実機エンジンに設置して、エンジンを稼働させた状態での性能を評価した。ここでは、エンジン油に硬質粒子である炭化ケイ素(SiC)を混合することで、エンジン部品の摩耗を促進させる台上試験(以下、「異常模擬試験」)を実施し、試験中のエンジン油における鉄粉濃度の推移を、試作した状態監視システムで測定し、異常検知の性能を評価した。

4.1 実機エンジンへの状態監視システムの設置

図3にエンジンへの状態監視システムの設置状況を示す。車載型分析装置を安定した状態でエンジンに取り付けることができるように、配管および取り付け用台座を製作した。車載型分析装置を取り付けた台座をエンジンのコンプレッサ台にボルトで固定した。また、車載型分析装置への給排油はエンジン油の給油口から行うこととした。オイルパンまで届く銅管を組み込んだ治具を製作して、給油口フタに代えて給油口に設置した。治具から車載型分析装置の配管を樹脂製ホースで接続した。測定に供する油は、治具を介して給油口に取り付けられた吸油管によりオイルパンから吸引され、測定後は同じ治具に取り付けられた排油管を通してオイルパンに戻る。車載型分析装置と記録装置は配線で接続し、記録装置から外部端末にWi-Fi経由で測定データが転送される。

4.2 異常模擬試験の概要

異常模擬試験は、鉄道総研国立研究所の台上試験装置に、供試エンジンを設置し、アイドリング(エンジン回転数約 600min^{-1})の条件で行った。本試験ではメインメタル等のエンジン内部部品に異常摩耗が発生する状態を模擬するために、粒径 $2\sim 3\mu\text{m}$ のSiC粉末をエンジン油に混入した状態でエンジンを回転させた。表2に異常

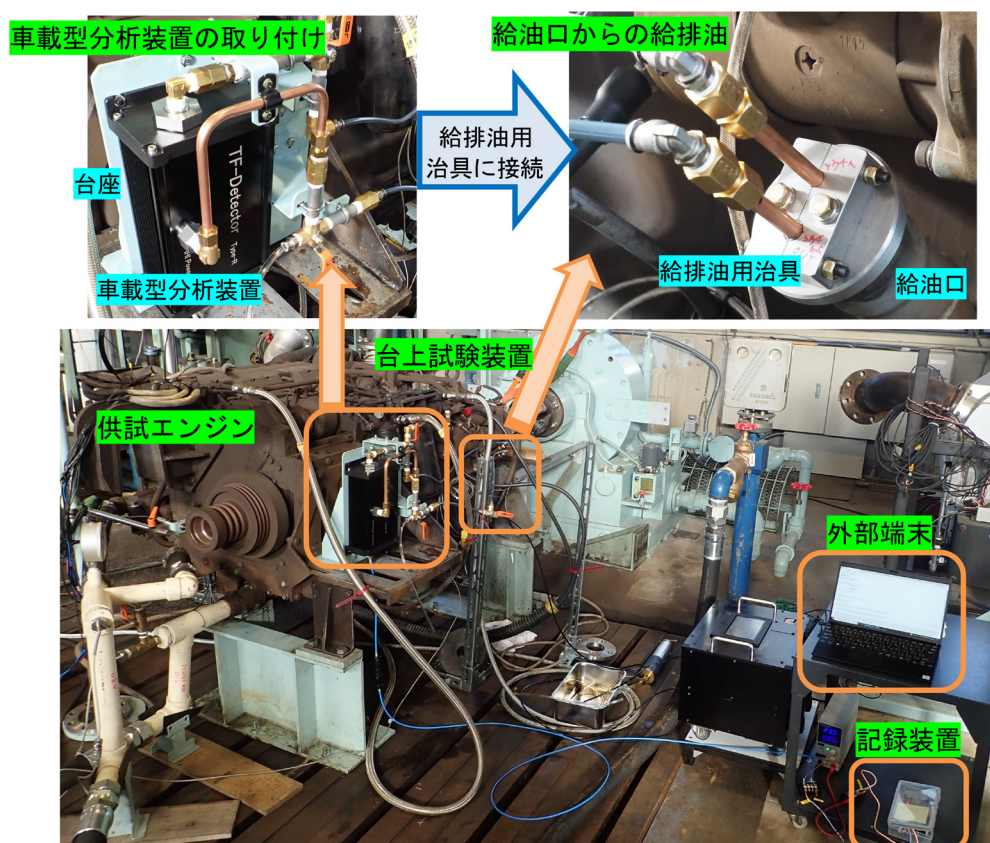


図3 エンジン台上試験における状態監視システムの設置状況

模擬試験の試番と試験開始からの運転時間、および各試番における SiC 濃度を示す。SiC 濃度は 0.01～0.02wt% とし、試番 3 の開始前に SiC 濃度が 0.02wt% になるように SiC を混合したエンジン油を給油した。また、各試番の開始時や終了時などのタイミングで定置型分析装置による測定も実施し、車載型分析装置による測定値との比較を行った。なお、今回実施した異常模擬試験においては、試験開始から試験終了までエンジンの動作に異常はなく、油温、油圧、排気温度等は正常な値であった。

4.3 エンジン油の鉄粉濃度測定結果

図 4 に異常模擬試験中の鉄粉濃度を連続的に測定した結果を示す。3600 秒付近（試番 1 終了の手前）、および 5010 秒付近（表 2 に示す電源異常の影響を受けた箇所）で一時乱れが見られたものの、おおむね安定してデータを取得できていることがわかる。詳細な鉄粉濃度の推移は以下のとおりである。

エンジン油に SiC を混入していない状態では、鉄粉濃度の測定値は数 ppm 程度である。エンジン油に SiC を 0.01wt% 混入した状態でエンジンを回転させると、SiC 混入直後から鉄粉濃度が上昇する。このことから、エンジン内部のしゅう動部品が摩耗し、鉄粉が発生していると推定される。一方、時間が経過すると鉄粉濃度の上昇が緩やかになり、SiC 濃度を 0.01wt% とした試番 1 および試番 2 では鉄粉濃度が約 150ppm に達すると鉄粉濃度がほとんど上昇しなくなる。SiC 濃度を 0.02wt%

に増加させた試番 3 では、再度鉄粉濃度は上昇するが、鉄粉濃度が 190ppm に達すると上昇しなくなる。また、長期間停止したのち運転した試番 4 では再度鉄粉濃度が上昇するが、約 200ppm に達すると一定値となる。これは、表 1 に示す通り、車載型分析装置の仕様上、測定上限が 200ppm であるため、鉄粉濃度が 200ppm を超える領域では正確に測定できていないことを示している。なお、試番 4 において、定置型分析装置（測定上限は 1000ppm）を用いて測定を行うと、試験終了時点で 371ppm まで鉄粉濃度が上昇していた。また、試番 1 から試番 3 までの鉄粉濃度の推移は、定置型分析装置による分析結果とほぼ一致した。

著者らは過去に営業車両から採取したエンジン油の性状分析を実施し、異常判定基準として 20ppm を提案した³⁾。異常判定基準は車両形式やエンジン型式等により異なるものの、200ppm を超えることは考えにくいため、エンジンの異常判定を目的とする場合は、測定上限が 200ppm であっても実用上問題はないと考えられる。

5. 現車試験による状態監視システムの実用性能評価

試作した状態監視システムについて、営業車両に設置し、車両走行時の性能や耐久性等について検証することを目的として、営業車両を使用した現車走行試験を実施した。本試験では、気動車に状態監視システムを仮設し、車両工場の構内試運転線を使用して、走行試験（以下、「構内走行試験」）を実施した。

5.1 営業車両への状態監視システムの仮設

営業車両への状態監視システムの仮設に際し、車載型分析装置および配管は、エンジン台上試験と同様に取り付け台座を使用してエンジンに固定した。車載型分析装置への給排油についても、エンジン台上試験と同様に、エンジンの給油口に取り付けた治具を使用し、配管と治具を銅管で接続した。

試番	SiC 投入後の 運転時間(秒)	SiC 濃度 (wt%)	備考
1	0～3600	0.01	
2	3600～6300	0.01	5010 秒付近で電源不具合のため分析装置を再起動
3	6300～9900	0.02	
4	9900～11700	0.02	試番 3 終了から 6 日後に開始

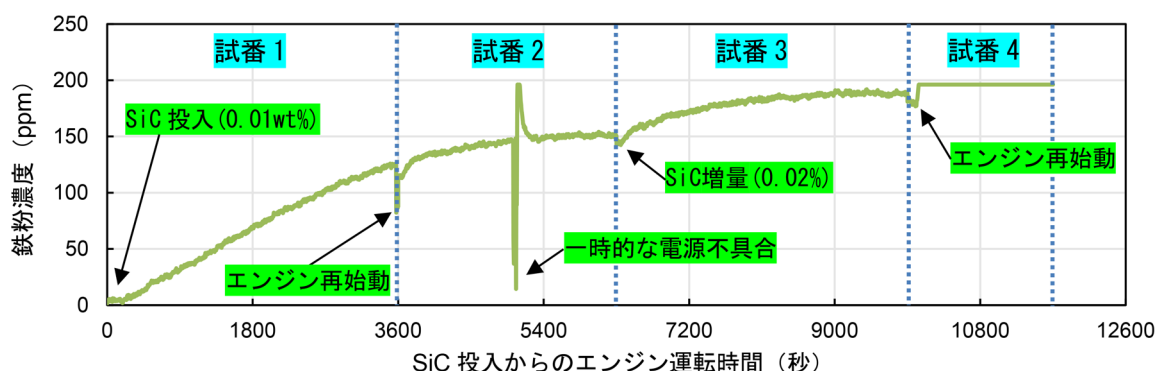


図 4 異常模擬試験における鉄粉濃度の推移

車載型分析装置および記録装置の駆動電源（DC24V）は、車上から絶縁 DC/DC コンバータ（24V/24V）を介して供給した。測定した鉄粉濃度のデータは、エンジン台上試験と同様に、客室内に設置した外部端末から Wi-Fi 経由で取得した。また、車上に設置したデータロガーにより、走行方向、ノッチ信号、走行速度（従軸速度）、エンジン回転数、エンジン油温度および装置近傍の振動加速度（前後方向、左右方向）等のデータを記録した。

5.2 エンジン空ぶかしによる動作確認

構内走行試験に先立ち、仮設後の状態監視装置および計測器などの動作を確認するため、エンジンを空ぶかしした際の鉄粉濃度を測定した。図 5 にエンジン回転数に対する鉄粉濃度測定値の推移を示す。アイドル回転時は 4～6ppm であった鉄粉濃度測定値が、ノッチが投入されるとエンジン回転数の上昇に対して 7～8 秒程度遅れて増加し、再びアイドル回転になると、エンジン回転数の低下に対してやや遅れて低下する傾向が見られた。鉄粉濃度測定値の最大は約 14ppm であった。なお、エンジン回転数の上下による鉄粉濃度測定値の増減は見られたが、再びアイドル回転に戻ると鉄粉濃度測定値は約 4ppm 前後と、ノッチ投入前の値になった。エンジン回転に伴う吸排油の不具合や、測定装置の配管の破損などの異常は見られなかった。

5.3 構内走行試験

構内走行試験では、状態監視システムを仮設した試験車両を、車両工場構内にある試運転線（約 250m の区間）で走行させた。運転条件は、最高速度までのノッチおよびブレーキのパターンを試番ごとに指定し、最高速度到達後は停止地点まで惰行走行とした。表 3 に試番および運転条件を示す。

図 6 に各試番における走行試験中の鉄粉濃度の推移を示す。試番 1、試番 9 を除く 9 試番において、エンジン回転数が上昇すると、7～8 秒遅れて鉄粉濃度測定値

が増加する傾向がみられた。また、エンジンがアイドリングになると、増加した鉄粉濃度測定値が徐々に低下し、走行前と同程度（4～6ppm）に戻る傾向もみられた。これは、5.2 節で述べたエンジン空ぶかし試験の結果と同様である。

走行試験後のエンジンから油を採取し、誘導結合プラズマ発光分析法（ICP 法）によりエンジン油の鉄分濃度を測定すると、約 6ppm であり、アイドリング時の鉄粉濃度測定値と近い値であった。したがって、エンジン回転数の上昇に伴う鉄粉濃度測定値の増加は、実際に鉄粉濃度が上昇しているのではなく、潤滑油センサの構造や仕様等に起因すると推定される。

エンジン回転数の上昇に伴う鉄粉濃度測定値の増加が確認された 9 試番はいずれも 2 ノッチ以上の走行条件で、エンジン回転数が 1000min^{-1} 以上であることから、鉄粉濃度測定値の上昇は、エンジン回転数が高いことにより発生している可能性が考えられる。ただし、その上昇幅は最大 45ppm（試番 3）から最小 10ppm（試番 11）とばらつきがあり、また運転パターンに対する有意な傾向も見られないため、原因の特定にはさらに詳細な検証を行う必要がある。

車両停止時および惰行時には、増加した鉄粉濃度測定値の低下を除き、顕著な鉄粉濃度測定値の上下は見られなかった。また、配管の破損や採油・排油の異常、装置本体や接続部等からの油漏れは、走行試験全体を通して

表 3 試番と運転条件

試番	運転条件	試番	運転条件
1	1N→惰行	7	2N→惰行
2	2N→惰行	8	2N→ブレーキ→2N
3	2N→再力行		再力行 繰り返し
4	3N→惰行	9	1N 再力行 繰り返し
5	2N→3N→惰行	10	2N 再力行 繰り返し
6	2N→2N 再力行	11	2N→2N 再力行

N: ノッチ 再力行: 一旦惰行とし、直後に指定のノッチを投入

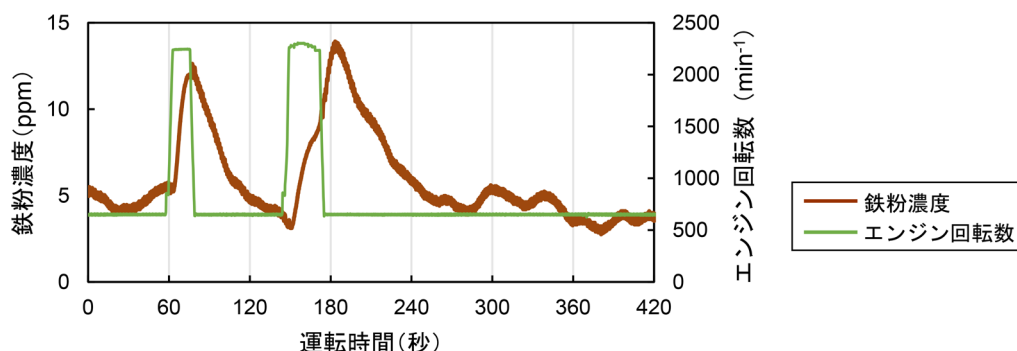


図 5 エンジン空ぶかし時の鉄粉濃度測定値の推移

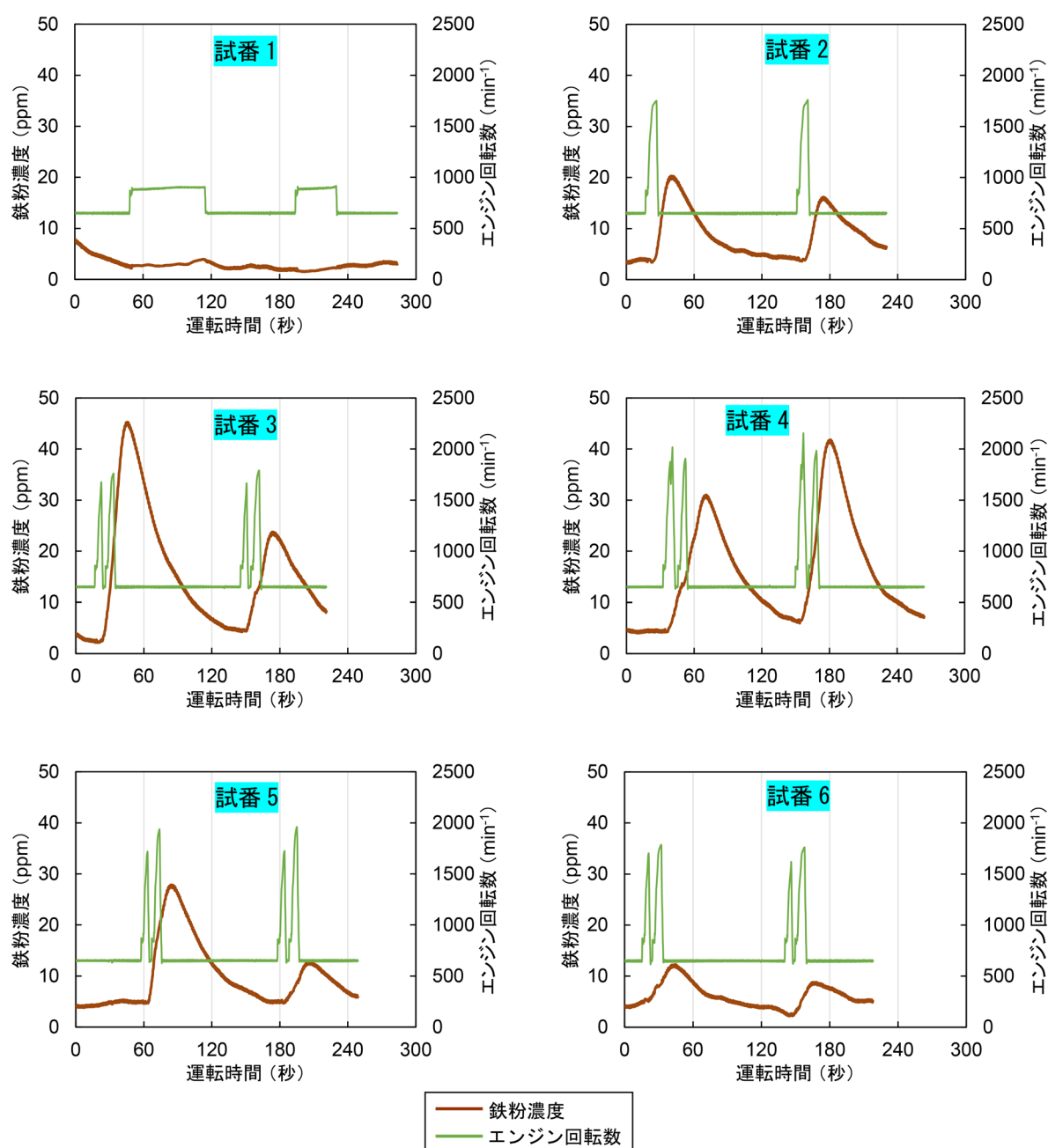


図 6 構内走行試験における鉄粉濃度の推移（その 1）

認められなかった。さらに、Wi-Fi によるデータ通信の状況は記録装置から約 50m の範囲において良好であった。以上から、エンジン回転数の上昇による鉄粉濃度測定値の増加を除き、今回の試験走行の条件において、試作した状態監視装置は正常に動作していたと判断できる。

6. 状態監視システムの適用方法と課題

状態監視システムを営業車両に適用する際の具体的な運用方法について、以下が考えられる。

(1) 重要部検査および全般検査等、解体を伴う定期検

査の入場時に、事前にエンジン内部の摩耗状態を把握し、検修計画を策定するために状態診断を行う。

(2) 交番検査等の更油時に、エンジン内部の異常の有無や油の状態を判断する目的で状態診断を行う。

(3) 出区点検や仕業検査等の日常的な点検・検査において、エンジン内部の異常の有無を確認し、車両運用中の故障を未然に防止する目的で状態診断を行う。

(4) 乗務員が異音や排気異常等、異常の兆候を認めた場合に、原因調査の一環としてエンジン内部の状態を推定するために状態診断を行う。

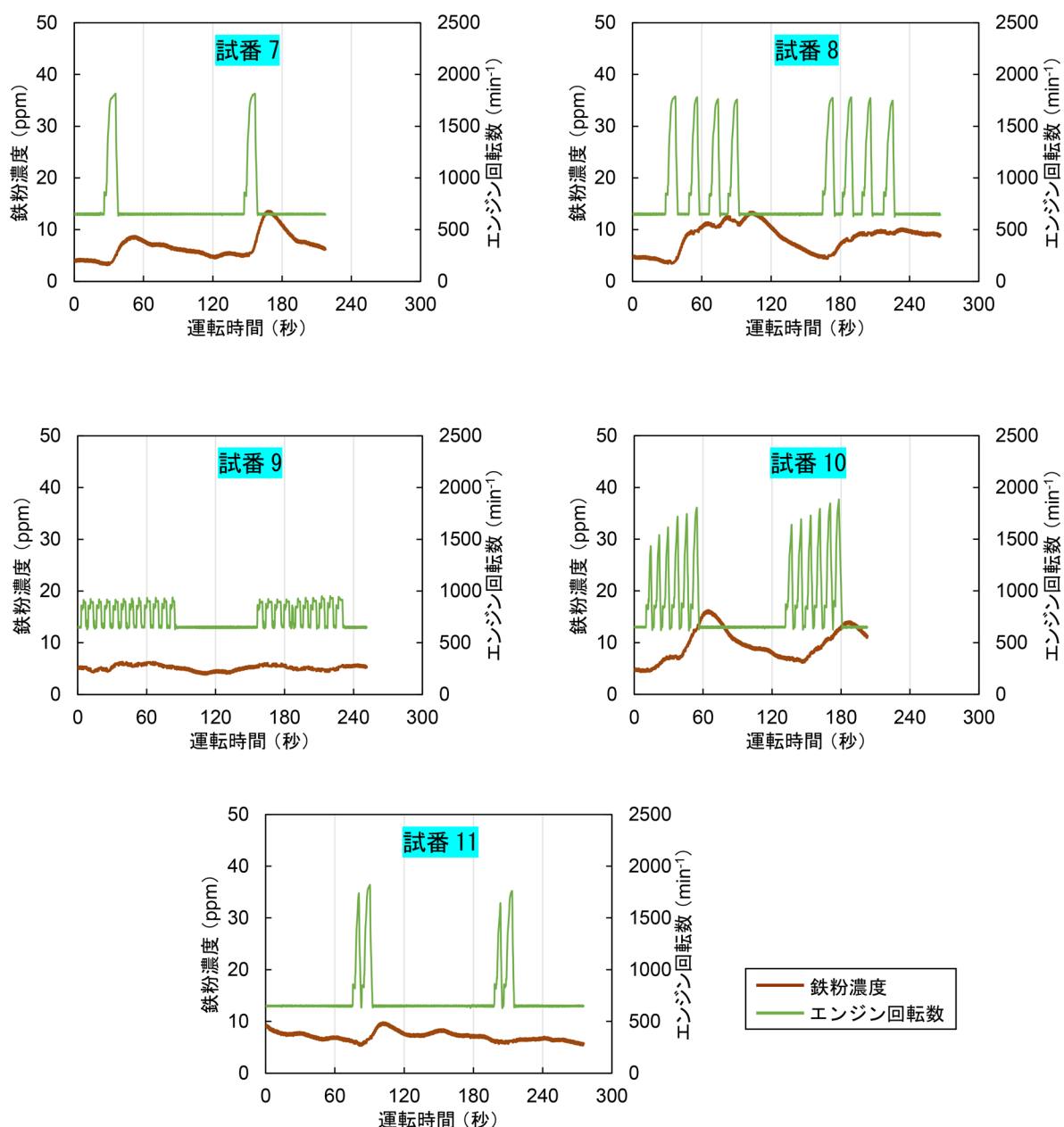


図6 構内走行試験における鉄粉濃度の推移（その2）

- (5) 営業列車の始発駅および終着駅等，車両運用中の決められたタイミングで1日数回～十数回程度の状態診断を行い，CBMに向けたデータを取得する。
- (6) 車両運用中を含め，エンジン稼働中は常時状態監視を行い，CBMに向けたデータを取得する。

5.2節で述べたとおり，状態監視システムはエンジン回転数の増加が測定値に影響をおよぼすことが課題であるが，少なくともアイドリングの状態であれば正常に動作する。上記運用のうち，(6)以外についてはアイドリングでデータを取得することが可能であり，状態監視システムが適用できると考えられる。(6)については，ノッチ投入によりエンジン回転数が増加しても鉄粉濃度

の測定値の変動を抑制できるようにセンサ側を改造する等の検討が必要である。また，実際の異常診断においては，測定データの蓄積および異常発生時のデータ解析を行い，適切な異常判定基準を決定する必要がある。

7. まとめ

潤滑油センサを利用した駆動用機器の状態監視システムを営業車両に適用するために，車載型分析装置の試作とデータ転送方法の検討，およびエンジン台上試験と現車試験による状態監視システムの性能評価を実施した。その結果，以下の知見が得られた。

- (1) 車両に搭載可能な潤滑油センサを使用した車載型分析装置、および測定データを Wi-Fi を利用して汎用的な外部端末に転送できる記録装置を試作し、気動車のエンジンに設置可能であることを確認した。
- (2) 実機のエンジンを使用した台上回転試験により、車載型分析装置と記録装置で構成される状態監視システムを適用することで、異物混入によるエンジン内部の摩耗に伴う、油中铁粉濃度の増加を把握できることを確認した。
- (3) 営業車両を使用した構内走行試験により、車両走行時においても、給排油、測定および Wi-Fi によるデータ転送等は正常に動作することを確認した。一方、エンジンの回転数が上昇すると、鉄粉濃度の測定値が影響を受けることが課題として示された。

謝 辞

本研究における車載型潤滑油分析装置を共同で開発した株式会社三井 E&S の藤井幹氏、西本功氏、および現車試験において多大なご協力をいただいた四国旅客鉄道株式会社の関係者に、この場を借りて厚くお礼申し上げます。

文 献

- 1) 鈴木政治, 細谷哲也, 中村和夫, 曾根康友: 油中摩耗粉分析によるディーゼルエンジンの異物混入故障の診断, 鉄道総研報告, Vol.10, No.8, pp.17-22, 1996
- 2) 鈴木淳一, 木川定之, 生駒一樹, 高重達郎: 可搬型潤滑油分析装置による気動車エンジンおよび変速機の異常診断, 鉄道総研報告, Vol.34, No.10, pp.29-34, 2020
- 3) 鈴木淳一, 木川定之: 潤滑油センサを用いた気動車用エンジンの異常検知, トライボロジー会議 2023 春 東京 予稿集, 2023

地盤と構造物の非線形化が応答変位法に用いる慣性力と地盤変位の組合せに及ぼす影響

田中 仁規* 坂井 公俊**

Influence of Nonlinearization of Ground and Structure on Combination of Inertia Force and Ground Deformation Used in Seismic Deformation Method

Niki TANAKA Kimitoshi SAKAI

In order to improve the accuracy of combining inertia force and ground deformation when using the seismic deformation method, we focused on the respective nonlinear behavior of the ground and the structure. Specifically, dynamic analyses were conducted for various types of grounds and structures under the condition that one of them became nonlinear, and the combination coefficients for the ratio of the period of grounds to the period of structures were calculated. As the result, we confirmed that the variation of the combination of actions was reduced by considering not only the relationship between the natural period of grounds and structures, but also the degree of nonlinearity of each. Based on these results, we proposed a new method which simply takes into account the degree of plasticization of the ground and structure. Using the proposed method, it is possible to determine more appropriate combination coefficients of ground deformation and inertial force than conventional methods.

キーワード：耐震設計，応答変位法，慣性力，地盤変位，非線形挙動

1. はじめに

深く根入れされた杭基礎などの基礎構造物は，地震時に上部工からの慣性力だけでなく，地盤変位の影響も強く受ける。そのため，このような構造物の地震応答値を算定する場合には，慣性力と地盤変位の両者の影響を考慮可能な解析モデル，解析手法を用いる必要がある。例えば，地盤と構造物を一体でモデル化した動的解析法を用いることで，慣性力と地盤変位の両者の影響を自動的に考慮した応答値の算定が可能である。その一方で，耐震設計実務においては，構造物のみをモデル化した静的解析法が用いられることもある^{例え(ば)1)}。この静的解析法において，慣性力と地盤変位の両者の影響を適切に考慮するためには多少の工夫が必要であり，鉄道構造物の耐震設計では古くから応答変位法²⁾が用いられている。

応答変位法によって構造物の地震応答値を算定する際に，慣性力と地盤変位は必ずしも同時に最大とならない。そのため，構造物の地震応答値の適切な算定や，これを考慮した合理的な耐震設計，耐震診断，耐震補強を実現するためには，作用の組合せ係数を適切に設定することが重要である。この作用の組合せ係数に関する検討は，以前から実施されており^{例え(ば)3) 4)}，これらの成果が建築基礎構造物⁵⁾や鉄道構造物¹⁾の設計に反映されている。

「鉄道構造物等設計標準・同解説（耐震設計）」¹⁾（以下，鉄道標準）では，構造物の固有周期 T_g と地盤の固有周期 T_g の比 α に対して，組合せ係数（補正係数 ν ）を算定可能である。ただし，この組合せ係数は限られた実験，解析に基づいて設定されたものであるため，組合せ係数の改良，高精度化を行う余地が多く残されている。

こうした状況を踏まえて著者らは，地盤，構造物が線形挙動をする場合に限定して網羅的な解析を実施し，これを整理することで，組合せ係数の改良手法を提案している^{6) 7)}。この検討では，地盤の固有周期 T_g が大きいほど組合せ係数が徐々に減少する傾向があることを明らかにするとともに，これを簡潔に考慮する手法を提案（図1）し，組合せ係数の精度向上を実現している。

しかし当然のように，L2地震動のような大規模地震を想定した場合の地盤，構造物は大きく非線形化する可能性があるため，このような地震を考える場合の組合せ

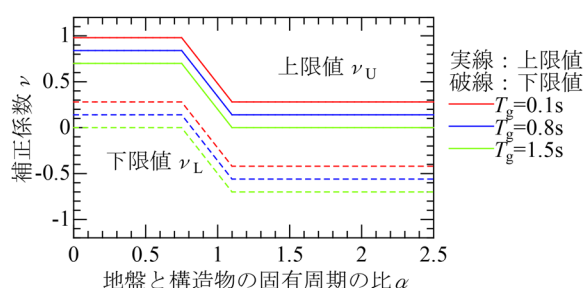


図1 地盤の固有周期を考慮した補正係数 ν ^{6) 7)}

* 元 鉄道地震工学研究センター 地震応答制御研究室

** 鉄道地震工学研究センター 地震応答制御研究室

係数としては、地盤、構造物の非線形挙動の影響も適切に考慮する必要がある。この非線形化の影響について、鉄道標準では、地盤の周期 T_g を剛性低減係数 α_g で除することで簡易的に考慮している¹⁾。この剛性低減係数 α_g は、L1 地震動に対して 0.70、L2 地震動に対して 0.50 と一定の値が設定されている。その一方で、同一の地震動レベルを考慮した場合にも、地盤条件によってその非線形程度は大きく変化する。また、大規模地震時には構造物も非線形挙動を示すため、この影響も適切に考慮する必要がある。これら非線形化の程度を簡易に考慮する手法として等価線形化法が考えられるが、地盤を一つの系とみなした場合の非線形化の程度を簡潔に表現する指標は存在しない。

そこで本稿では、地盤、構造物それぞれの非線形挙動に着目して、応答変位法による慣性力と地盤変位を組み合わせるための係数（以降、補正係数 ν ）を高精度化するための検討⁸⁾について報告する。具体的には、地盤と構造物のいずれか一方の非線形化挙動を考慮した上で、多様な条件における地震応答解析を実施する。これらの結果をもとに、地盤、構造物の非線形化の程度を簡易に考慮、補正する手法を提案する。最後に、著者らが過去に提案している地盤・構造物の補正係数の算定手法^{6) 7)}とこの成果を組み合わせることで、現行の鉄道標準による手法をそのまま用いた場合と比較して、より適切な結果が得られることを確認する。

2. 検討方法及び解析条件

2.1 解析の条件

本検討では、多様な地盤と構造物を組み合わせる網羅的な動的解析を実施する。解析は、構造物の非線形挙動に着目する場合と、地盤の非線形挙動に着目する場合について実施することとし、どちらか一方を線形条件、もう一方を非線形の条件で行う。本章では、対象とした地盤、構造物の解析条件、動的解析結果の処理方法について整理する。

2.1.1 地盤の応答解析の条件

地盤応答解析では地盤の時間領域の動的解析法を実施した。対象地盤は、多様な地層構成を有する 50 地盤を用いる。この 50 地盤は、全国の地盤ボーリングデータを用いた地盤応答解析による地表面地震動の確率特性を良好に表現可能な標準地盤として提案⁹⁾されているものである。地盤の非線形モデルは、GHE-S モデル¹⁰⁾を用いるとともに、動的解析時の減衰定数は地盤のせん断弾性波速度、土質分類をパラメータとして周波数依存性を考慮した Q 値の提案式¹¹⁾に可能な限り一致するようなレーリー減衰を地盤毎に設定する。具体的な地層構成や地盤パラメータの設定方法等は文献⁹⁾を参照されたい。

入力地震動は鉄道構造物の耐震設計で一般的に用いられる標準 L2 地震動（スペクトル II）¹⁾を基本として用いることとし、多様な非線形条件に対する結果を得るために振幅を 0.1~2.0 倍まで 20 パターン変化させることとした。

2.1.2 構造物の応答解析の条件

地盤応答解析で得られた地表面地震動を入力とした構造物の応答解析を実施することで、構造物天端の応答波形を算定する。構造物は、等価な 1 自由度モデルで表現する^{例えば 1)}こととした。構造物のパラメータは固有周期 T_s と降伏震度 k_{hy} であるが、鉄道構造物の耐震設計ではこれらのパラメータは構造物全体を多自由度系でモデル化したプッシュオーバー解析によって算定することができる。構造物の解析モデルは、基礎を含むすべての部材を梁要素で、地盤と基礎の相互作用をばね要素でモデル化している。そのため、この固有周期 T_s と降伏震度 k_{hy} をパラメータとした解析モデルによって得られる構造物応答は、地盤変位の影響を無視した上で、構造物の振動特性としては地盤-基礎の相互作用も考慮した上での挙動となる。そのため、地盤変位の影響を応答変位法によって別途考慮することで、地盤-基礎-構造物の影響を適切に含んだ地震応答の評価が可能となる¹⁾。

この構造物の等価 1 自由度モデルに与える構造物の固有周期 T_s は、最終的な補正係数 ν の算定結果を地盤と構造物の固有周期比 $\alpha (= T_s/T_g)$ で整理することを念頭に、各地盤の固有周期 T_g に対して周期比 α が 0.1~2.5 まで 0.1 刻みで 25 タイプとなるように設定した。構造物の減衰定数 h は 0.05 とした。構造物の非線形特性は鉄道 RC 高架橋を想定して、骨格を降伏震度 k_{hy} で折れ曲がるバイリニアモデル、履歴を Clough モデル（第 2 勾配比 $\alpha = 0.1$ 、戻り剛性指数 $\beta = 0.2$ ）とした¹⁾。構造物の降伏震度 k_{hy} は 0.05 と 0.1~3.0 の間で 0.1 刻みの 31 パターンを設定した。

なお今回の各条件の組み合わせによっては、構造物の応答塑性率 $\mu_s (= \text{最大変位 } \delta_{\max} / \text{降伏変位 } \delta_y)$ が極端に大きくなる場合も存在する。そこで最終的には、現在の構造物が有する変形性能として現実的な範囲 ($\mu_s \leq 10$) の結果を抽出して整理を行う。

2.2 解析結果の整理方法

地盤、構造物の応答解析から、それぞれ時刻歴応答 $\delta_g(t)$ 、 $\delta_s(t)$ が得られる。このうち $\delta_g(t)$ は解析モデル下端（工学的基盤上面）からの地盤の相対変位、 $\delta_s(t)$ は構造物の応答変位であり、この両者を用いて補正係数 ν を算定する。ここで、本検討における構造物の応答としては応答加速度（慣性力）ではなく応答変位を用いる。この理由としては、鉄道構造物の耐震設計では慣性力に伴う構造物の応答変位をもとに性能照査を実施しており、基本的には慣性力と構造物の応答は 1 対 1 で対応する。しかしながら、

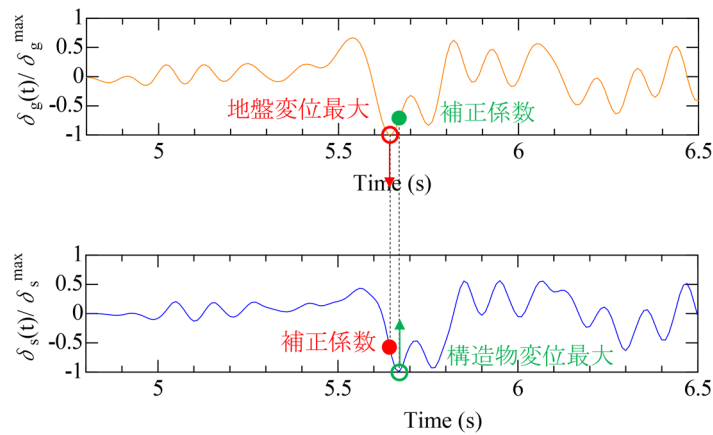


図2 正規化した地盤、構造物の応答変位波形
($T_g = 0.12\text{s}$, $T_s = 0.04\text{s}$, $k_{hy} = 0.10$ の場合)

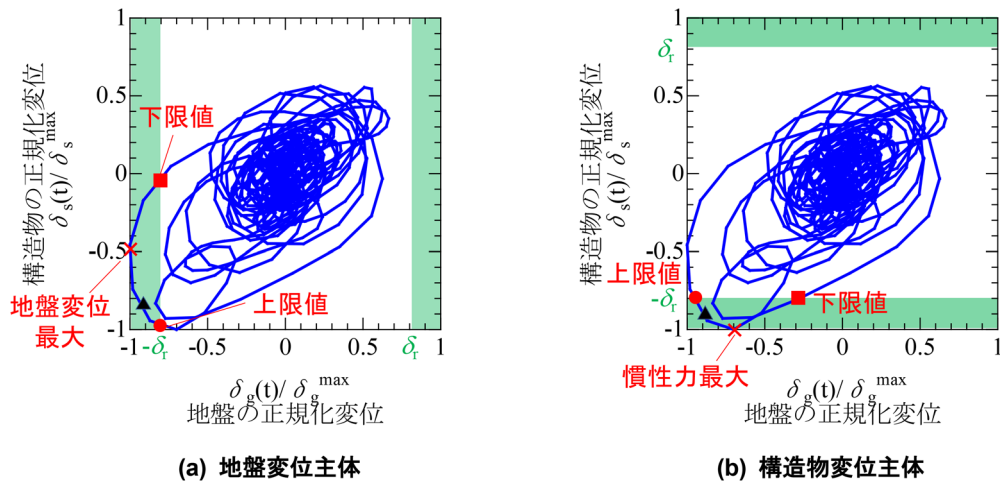


図3 地盤変位—構造物変位関係の例

(地盤線形、構造物非線形、 $T_g = 0.12\text{s}$, $T_s = 0.04\text{s}$, $k_{hy} = 0.10$ の場合)

構造物の応答加速度には構造物応答と関係のない高振動数成分の影響が顕著になる場合があり、構造物の応答変位とは対応しない状況も散見されるため、慣性力ではなく変位に基づく整理を行うこととする。

時刻歴応答をそれぞれの最大値 $\delta_g^{\max}$, $\delta_s^{\max}$ で正規化した例を図2に示す。地盤変位が最大となる瞬間 ($\delta_g(t)/\delta_g^{\max} = 1.0$ 時) の構造物変位 (図2の赤色●印) と、構造物変位が最大となる瞬間 ($\delta_s(t)/\delta_s^{\max} = 1.0$ 時) の地盤変位 (図2の緑色●印) をそれぞれ抽出し、これが各ケースでの補正係数 ν となる。

ここで、横軸に地盤の正規化応答変位 $\delta_g(t)/\delta_g^{\max}$ 、縦軸に構造物の正規化応答変位 $\delta_s(t)/\delta_s^{\max}$ で表示した結果を図3に示す。図3 (a), (b) はそれぞれ同一の関係を図示しており、図3 (a) では地盤変位が最大となる瞬間、図3 (b) では構造物変位が最大となる瞬間に着目している。当然のように地盤変位、構造物変位のそれぞれが最大となる瞬間は、それぞれ縦軸および横軸の値が $+1.0$

あるいは -1.0 となる線と点で接している (今回のケースでは、地盤変位最大時の $\nu = 0.46$ (図3 (a) の赤色 × 印)、構造物変位最大時の $\nu = 0.70$ (図3 (b) の赤色 × 印))。ただし、それ以外にも地盤変位、構造物変位の組合せがともに大きくなるタイミング (例えば図3 (a), (b) の黒▲印) が存在しており、構造物の設計を考えた場合には、この瞬間の方が構造物の応答値や断面力、損傷程度という観点でより厳しくなる可能性も考えられる。そこで、正規化した応答波形に対してパラメータ δ_r を設定し、 $\delta_g(t)/\delta_g^{\max}$ 及び $\delta_s(t)/\delta_s^{\max}$ が δ_r 以上 1.0 以下の範囲での最大値、最小値を自動的に抽出し、これを上限値、下限値として整理⁸⁾ することとした。この δ_r は既往の検討^{6) 7)} と同様に $\delta_r = 0.90$ を用いた。この場合の結果も図3に示しているが、このような対応を取ること、ある程度の幅を持った評価が可能であるとともに、膨大な解析ケースに対しても自動での補正係数 ν の抽出が可能となる。

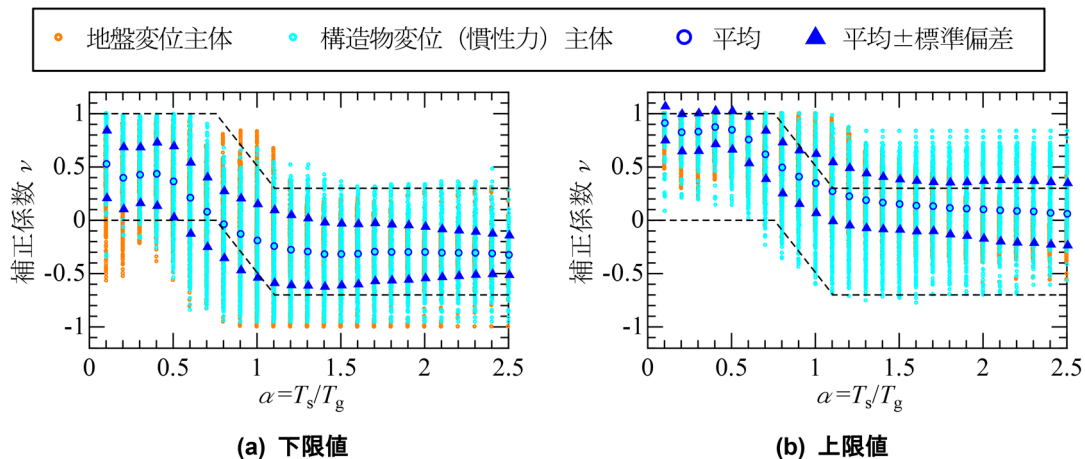


図4 構造物が非線形の場合の補正係数の上限値及び下限値（全結果）

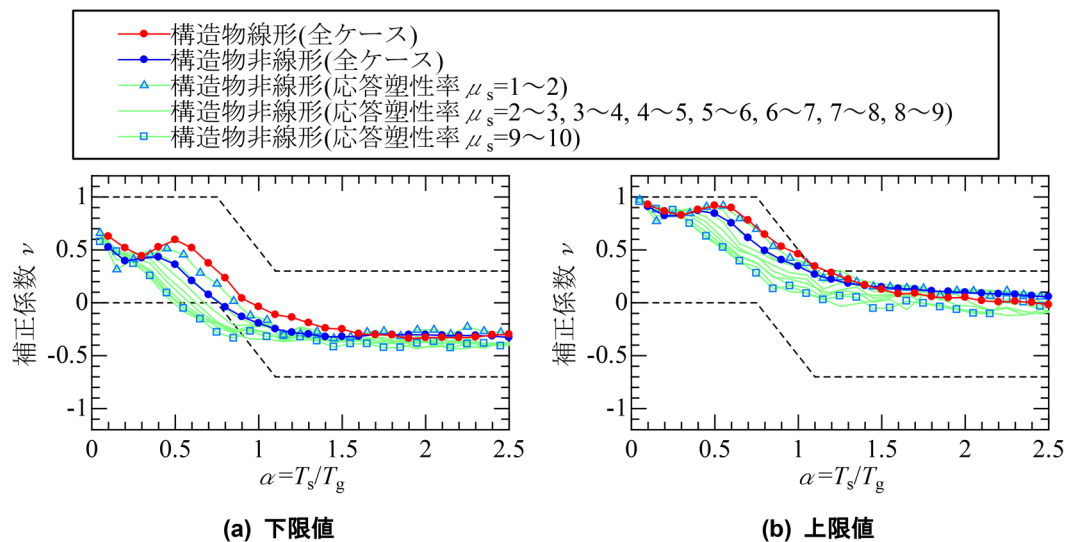


図5 構造物が非線形の場合の補正係数の平均値（構造物が線形の場合との比較）

3. 構造物の非線形挙動を考慮した条件での補正係数

3.1 補正係数νの算定結果

前章で整理した条件に基づき、地盤、構造物のいずれか一方の非線形化を考慮した動的解析を網羅的に実施した。本章ではこのうち、地盤は線形とし、構造物の非線形化を考慮した条件について整理、考察する。

全解析ケースを対象に慣性力と地盤変位を組み合わせるための補正係数νを算定し、地盤の固有周期 T_g と構造物の固有周期 T_s の比率 $\alpha (= T_s/T_g)$ を指標として整理した結果を図4に示す。この図には、全データを一定の範囲の周期比 α に分類（例えば $0.05 \leq \alpha < 0.15$, $0.15 \leq \alpha < 0.25$ など）し、分類毎の補正係数νの平均値、標準偏差を算定した結果も示している。これを見ると、同一の周期比 α であっても解析条件によって補正係数νにはばらつきが見られるが、全体的な傾向としては周期比 α

の増大に伴って補正係数νは徐々に小さくなることが分かる。これは上限値、下限値によらず共通して見られる傾向であり、鉄道標準¹⁾の表現（図4の破線）で全体的な傾向を表現可能であることが分かる。

続いて、構造物の塑性化程度の違いによる補正係数νの変化の傾向を把握するための整理を行う。まず図4と同様に全データを周期比 α で分類した上で、構造物の応答塑性率 μ_s に対してもある一定の範囲毎に分類（例えば $1 \leq \mu_s < 2$, $2 \leq \mu_s < 3$ など）し、補正係数νの平均値を算定した。この結果を図5に示す。図5には、全結果の補正係数νの平均値（図5の青色の●印）、地盤と構造物の両者を線形状態とした場合の補正係数νの平均値（図5の赤色の●印）も示している。

図5より、同一の周期比 α であっても構造物の応答塑性率 μ_s が大きくなるにしたがって、徐々に補正係数νが小さくなっているように見える。これは別の解釈として、応答塑性率 μ_s が大きくなるに伴って、全体的に補

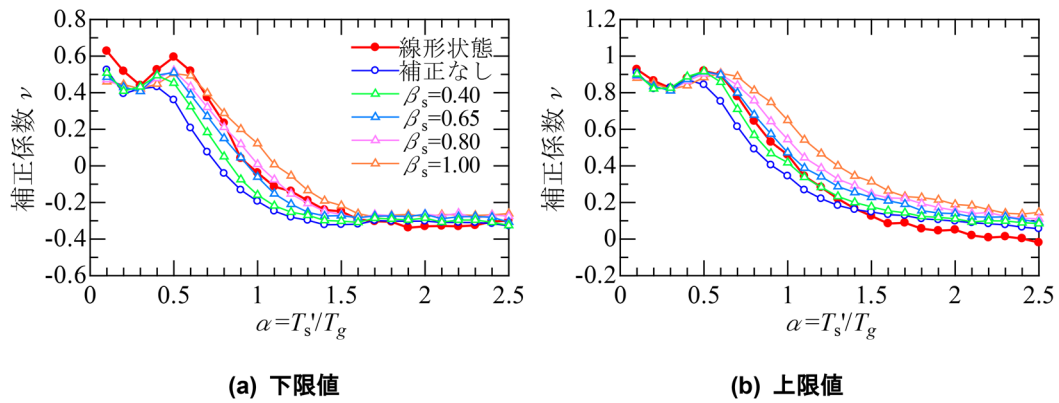


図6 構造物が非線形の場合の補正係数の平均値（換算係数の比較 β_s の比較）

正係数 ν が徐々に左側に移動していると捉えることもでき、本検討では非線形化に伴う周期比 α の変化という観点で考察を行う。具体的には、構造物の非線形化に伴って振動中の卓越周期が固有周期 T_s よりも長くなる。その結果として見かけの周期比 α が線形時の周期比 α よりも大きくなるため、結果として構造物の非線形化に伴って全体的に左側に移動していると解釈される。

3.2 構造物の非線形挙動考慮の検討

前節での検討より、構造物の非線形化に伴う振動卓越周期の長周期化によって、構造物線形時と比較して補正係数 ν の傾向が変化することを確認した。そこで、構造物の振動卓越周期を等価線形化法に基づく式(1)で補正することで、構造物の非線形化に対応することを考える。この時に、各要素の非線形化に伴って補正係数 ν を変化させる方法も考えられるが、鉄道構造物の耐震設計では地盤の非線形化の影響を周期補正によって表現している¹⁾ ため、本検討においても周期を補正することで補正係数 ν を適切に表現する方法を採用する。

$$T'_s = \sqrt{\beta_s \mu_s} \times T_s \quad (1)$$

ここで、 T'_s ：補正後の構造物の固有周期 (s)、 μ_s ：構造物の応答塑性率、 β_s ：換算係数である。この換算係数 β_s として 0.4, 0.65, 0.8, 1.0 を設定し、これらの中から適切な条件を選定することとした。具体的には、式(1)により補正係数 ν が線形状態に近くなる換算係数 β_s を選定する。この時に、式(1)で構造物の非線形化の影響を補正することによって、周期比 α ($= T'_s/T_g$) が様々な値になるが、今回は補正後の周期比 α をある範囲（例えば $0.05 \leq \alpha < 0.15$, $0.15 \leq \alpha < 0.25$ など）に分類するとともに、各分類の補正係数 ν の平均値を算定し、周期比 α の範囲の代表値 ($\alpha = 0.1, 0.2$ など) に対してプロットすることとした。最終的に得られた結果を図6に示す。この図には、図5と同様に線形状態、および非線形化の

影響を補正していない状態での平均値も併せて示す。図6を見ると、構造物の非線形化の影響を補正することで、補正係数 ν の分布が全体的に右側に移動していることが確認できる。このうち補正係数 ν の下限値の結果（図6 (a)）に着目すると、 $\beta_s = 0.65$ や $\beta_s = 0.80$ において線形状態と近い結果が得られる。一方で、上限値（図6 (b)）に着目すると $\beta_s = 0.40$ や $\beta_s = 0.65$ において線形状態と近い値となっている。

以上を踏まえて、 $\beta_s = 0.65$ を用いて構造物の非線形挙動の影響を考慮することとした。最終的には、式(1)において $T'_s \geq T_s$ を制約条件として、次式によって構造物の非線形挙動を考慮することになる。

$$\begin{aligned} T'_s &= T_s & (0.65 \mu_s < 1 \text{ の場合}) \\ T'_s &= \sqrt{0.65 \mu_s} \times T_s & (0.65 \mu_s \geq 1 \text{ の場合}) \end{aligned} \quad (2)$$

以上の方法で補正した構造物の固有周期 T'_s を用いて算定した周期比 α 及び補正係数 ν の関係を図7に示す。これを見ると、上限値、下限値ともに補正ありの場合（図7の青色の●印）は補正なし（図7の橙色の○印）に比べて線形状態（図7の赤色の●印）の分布に近づくことが確認できる。つまり、式(2)によって構造物の非線形化程度を補正できている。そのため、式(2)を用いて簡易的に構造物の非線形化の影響を考慮するとともに、この周期 T'_s を用いて筆者らが提案^{6) 7)} する補正係数 ν を推定することで、従来の構造物非線形挙動の影響を無視していた場合と比較して、より信頼性の高い補正係数 ν の設定が期待される。

4. 地盤の非線形挙動を考慮した条件での補正係数

4.1 補正係数 ν の算定結果

続いて本章では、構造物は線形とし、地盤の非線形挙

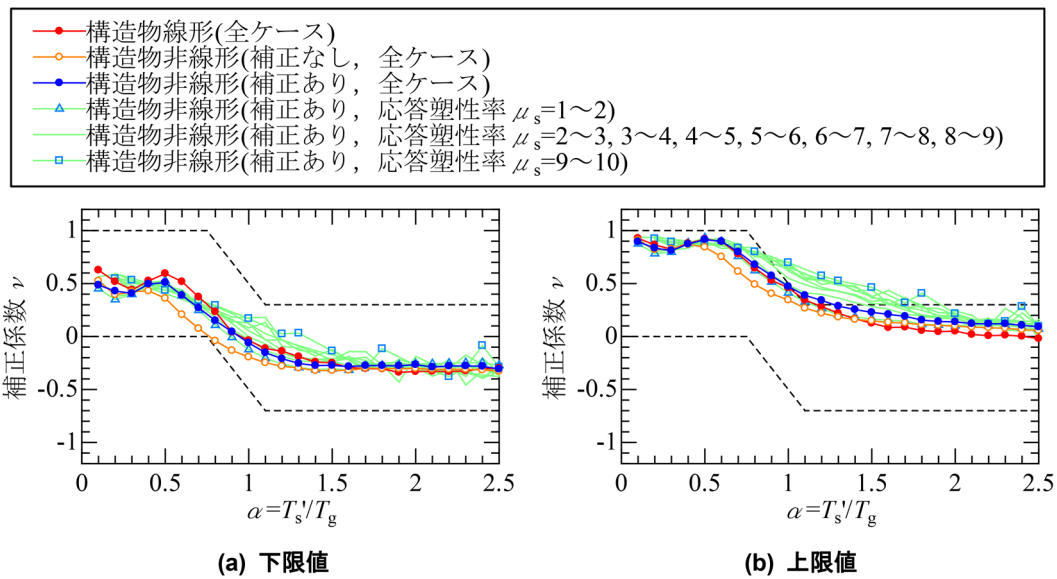


図7 構造物の非線形化を考慮した補正係数の平均値（構造物が線形の場合との比較）

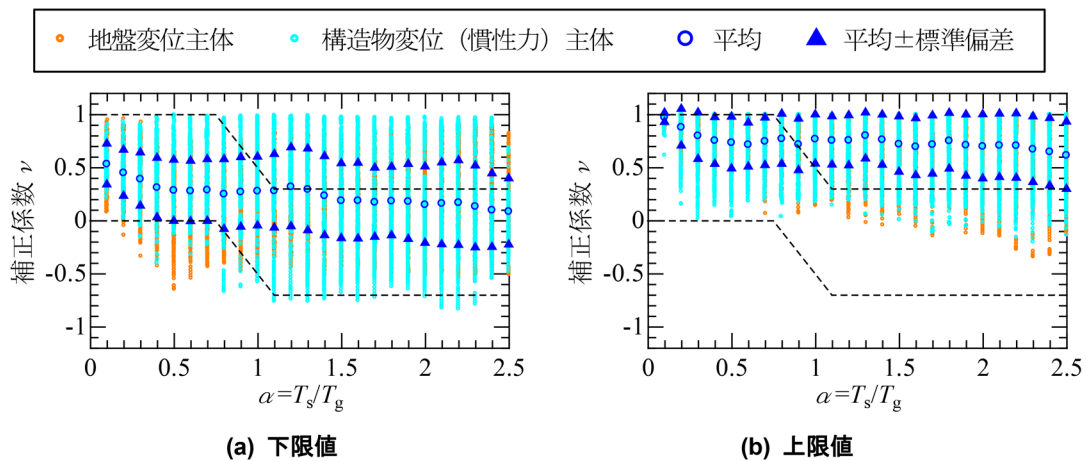


図8 地盤が非線形の場合の補正係数の上限値及び下限値（全結果）

動を考慮した条件の結果を対象に整理，考察を行う。全解析ケースに対して補正係数 ν を算定し，周期比 α で整理した結果を図8に示す。これを見ると，同一の周期比 α であっても補正係数 ν は大きくばらつく。平均値の傾向に着目すると，周期比 α が大きくなると補正係数 ν は多少小さくなっており，鉄道標準による補正係数¹⁾（図8の破線）と同様の傾向ではあるが，その変化の程度は大きく異なっている。これは前章と同様に，地盤の非線形挙動によって振動卓越周期が変化するため，従来の線形時の周期比 α （ $=T_s/T_g$ ）では全体の傾向を表現できていないためであると考えられる。

4.2 地盤の非線形挙動考慮の検討

地盤の非線形化の程度を固有周期 T_g に考慮する方法を考える。構造物の非線形化の大小は，応答塑性率 μ_s によって定量的に表現可能である。これに対して地盤の

非線形化の程度を一般化する指標は存在せず，例えば鉄道標準ではL1地震動，L2地震動という地震動のレベルに応じて非線形化の程度を一つ設定している。しかしながら，当然のように当該箇所の地盤条件によって非線形化の程度も大きく変化するため，これを適切に考慮できることが望ましい。

そこで本検討では，次式によって地盤の応答塑性率 μ_g を定義し，これによって地盤の非線形化程度を考慮する方法を提案する。

$$\mu_g = \delta_{\max} / \delta_r \quad (3)$$

ここで， μ_g ：地盤の応答塑性率， $\delta_{\max}$ ：最大応答変位（cm）， δ_r ：規準変位¹⁾（cm）である。この規準変位 δ_r は，表層地盤全体としての剛性が初期の0.5倍になる時の地表面変位として定義され，表層地盤の静的非線形解

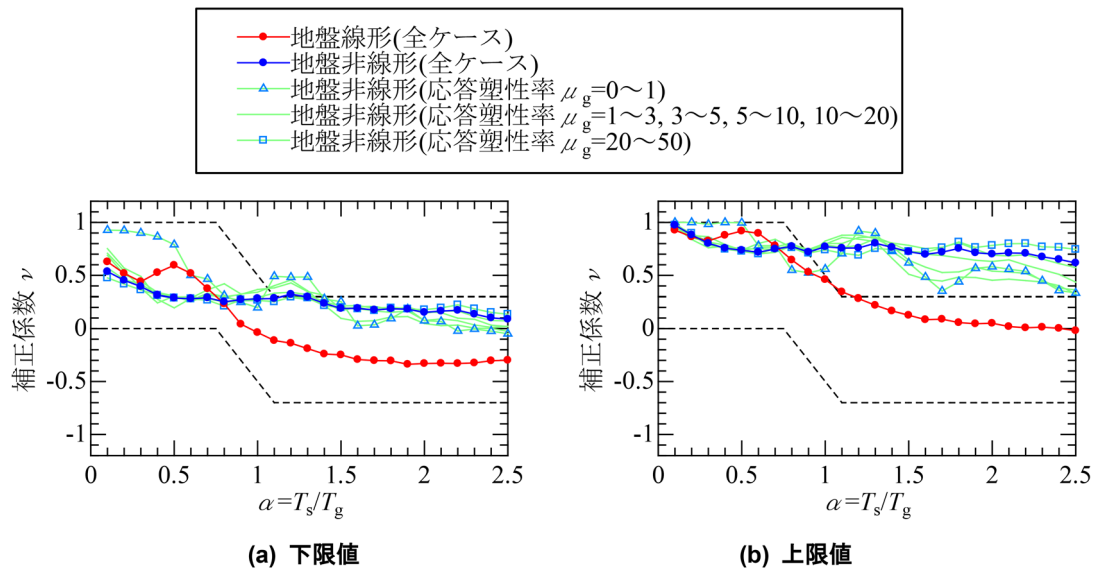


図9 地盤が非線形の場合の補正係数の平均値（地盤が線形の場合との比較）

析¹²⁾によって算定することが出来る。またこの規準変位 δ_r と固有周期 T_g のみから、次式によって表層地盤の強度に関する指標の一つである地盤強度比 K_f ¹³⁾ を算出することも可能である。

$$K_f = \frac{1}{T_g^2} \cdot \delta_r \quad (4)$$

この地盤強度比 K_f を指標として用いることで、地盤増幅率の高度化¹⁴⁾ ¹⁵⁾、大規模地震時の地盤分類の高度化¹⁶⁾ ¹⁷⁾ 等が可能であることを確認している。この地盤強度比 K_f を制御する指標である規準変位 δ_r は、地盤の非線形化のしやすさを表現するものであり、最大変位 δ_{max} をこれで除することで、構造物の応答塑性率 μ_g と同様に非線形化の大小を適切に表現可能となることが期待される。

そこで、式(3)によって算定される地盤の応答塑性率 μ_g の値毎に、地盤が非線形の場合の補正係数の分布を図9に黄緑色の実線で示す。この図には、地盤線形とした場合（図9の赤色の●印）の結果、地盤非線形の場合の全結果の平均（図9の青色の●印）も示している。この結果より、地盤の応答塑性率 μ_g が大きいほど、線形時の補正係数との乖離が大きくなっており、線形状態に比べて徐々に右に移動しているように見える。これは、地盤の非線形化に伴って振動中の卓越周期が固有周期 T_g よりも長くなり、結果として見かけの周期比 α が小さくなったためであると捉えることができる。そのため、今回新たに式(3)という形で提案を行った地盤の応答塑性率 μ_g という指標で整理することで、地盤の塑性化の程度を簡易的に表現できていると解釈できる。

そこで、地盤の応答塑性率 μ_g を考慮して地盤の固有

周期 T_g を補正することを試みる。この時には前章の構造物における検討と同形式の次式によって、地盤の非線形化を簡易的に考慮する。

$$T_g' = \sqrt{\beta_g \mu_g} \times T_g \quad (5)$$

ここで、 T_g' ：補正後の地盤の固有周期、 β_g ：換算係数である。この換算係数 β_g について、構造物非線形化の検討と同様に0.4, 0.65, 0.8, 1.0を設定し、地盤線形条件の結果と比較を行った結果を図10に示す。図10から、式(5)によって地盤の非線形挙動の影響を考慮することで、線形時の結果により近い傾向を示すことが確認できる。ただし、補正係数 ν の傾向は下限値、上限値ともに換算係数 β_g によって大きく変わらない。図10(b)に示した上限値の細部に着目すると、線形状態では周期比 α が0.3~0.5の範囲で補正係数 ν が多少大きくなる一方で0.5以降において減少しているが、これと同様の傾向が $\beta_g=0.65$ とした結果において確認できる。

そこで、①構造物非線形化との整合性があること、②地盤の等価線形化法における有効ひずみ換算係数の代表的な値が0.65である^{例えば¹⁸⁾} こと、③図10(b)の線形状態と補正係数 ν の変化の傾向が類似していること等を勘案して、本検討では $\beta_g=0.65$ を採用し、以降の考察を行うこととする。なお、構造物非線形化の検討と同様に $T_g' \geq T_g$ を制約条件とすると、式(6)により地盤の非線形挙動を簡易に考慮することになる。

$$\begin{aligned} T_g' &= T_g & (0.65 \mu_g < 1 \text{ の場合}) \\ T_g' &= \sqrt{0.65 \mu_g} \times T_g & (0.65 \mu_g \geq 1 \text{ の場合}) \end{aligned} \quad (6)$$

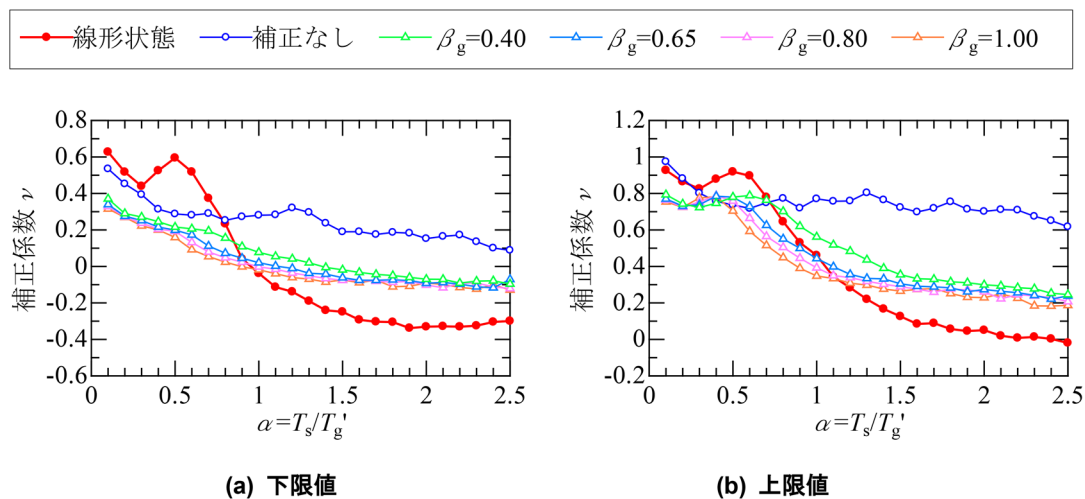


図 10 地盤が非線形の場合の補正係数の平均値（換算係数の比較 β の比較）

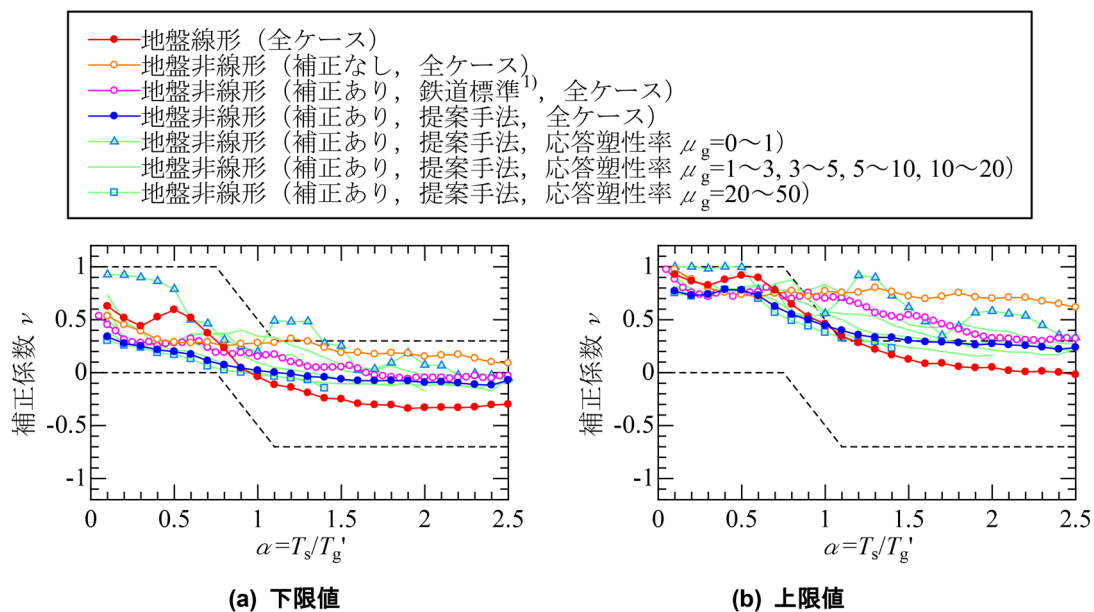


図 11 地盤の非線形化を考慮した補正係数の平均値（地盤が線形の場合との比較）

以上の方法で補正した地盤の固有周期 T_g' から算定した周期比 α 及び補正係数 ν の関係を図 11 に示す。これを見ると上限値，下限値ともに補正ありの場合（図 11 の青色の●印）は補正無し（図 11 の橙色の○印）に比べて線形状態（図 11 の赤色の●印）の分布に近づくことを確認した。さらに、鉄道標準¹⁾による地盤の非線形化の換算方法（図 11 の紫色の○印）と提案手法の結果を比較すると、下限値には大きな差が見られないが、上限値は明らかに提案手法の方が線形状態に近づいている。そのため、今回提案した地盤の応答塑性率 μ_g を用いて簡易的に非線形化の影響を考慮し、これを用いて筆者らが提案⁷⁾する補正係数 ν を算定することで、補正係数 ν の精度向上が期待される。

5. 提案手法の有効性の確認

これまでの検討によって、構造物、地盤それぞれの非線形挙動の影響を考慮した上で、補正係数 ν を算定可能となる。ここでは、この提案手法の有効性を確認する。具体的には、前章までの全解析結果に対して、式 (2)、式 (6) を用いて各固有周期の補正を行うとともに、これより得られる周期比 α を用いて補正係数 $\nu^{(7)}$ を算定した。得られた補正係数 ν を、動的解析によって得られる補正係数 ν と比較した結果を図 12（構造物の非線形化を考慮した条件）、図 13（地盤の非線形化を考慮した条件）に示す。これらの図には、鉄道標準¹⁾に基づく補正係数も従来法として示している。

構造物の非線形化を考慮した図 12 では、上限値，下

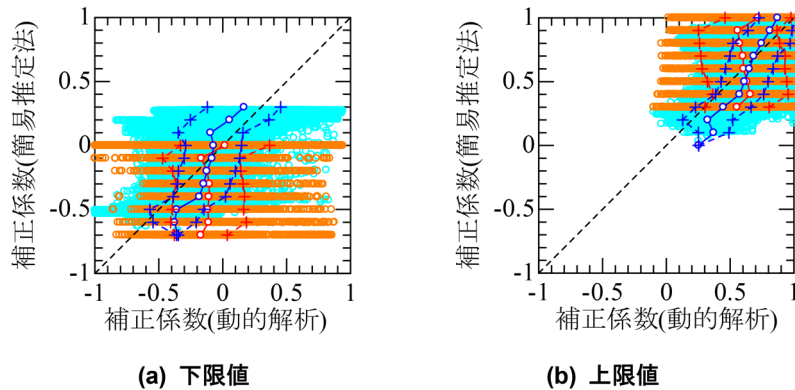
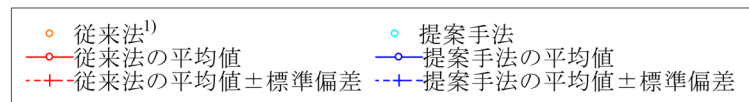


図 12 提案手法の有効性の確認（構造物：非線形，地盤：線形）

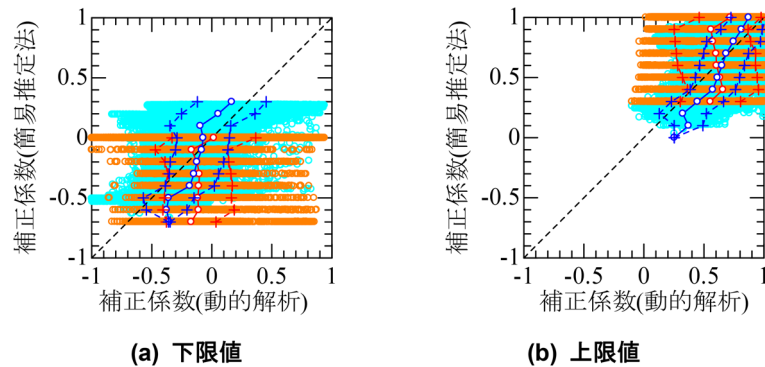


図 13 提案手法の有効性の確認（構造物：線形，地盤：非線形）

限值ともに提案手法を用いて補正を実施することで、従来法よりも動的解析による補正係数に対して1対1に近づき、ばらつきも小さくなった。従って、提案手法により構造物の非線形化の影響を適切に補正できている。また、地盤の非線形化を考慮した図 13 においても、従来法と比較して提案手法の方が動的解析による補正係数により近く、ばらつきも小さくなり、より適切に地盤の非線形化の影響を考慮できていることが確認される。つまり提案手法を用いて地盤、構造物の非線形化の程度を簡易に考慮することで、従来の設計で用いられている補正係数と比較して、より適切な作用の組み合わせが設定可能であると言える。

6. まとめ

本検討では、杭基礎などの基礎構造物の地震応答値を応答変位法によって算出する際の慣性力と地盤変位の組合せ係数の高度化に向けた検討を行った。得られた知見を以下に示す。

- (1) 多数の地盤、構造物に対して非線形動的解析を実施するとともに、この結果から慣性力と地盤変位の補正係数 v を自動処理する方法を整理した。この補正係数 v を地盤と構造物の周期比 α で整理したところ、地盤、構造物の非線形化に伴って、補正係数 v の分布形状は両者線形の時と比べて左右（周期比 α 軸方向）に徐々に移動する傾向を示すことを確認した。
- (2) 地盤、構造物の非線形化の影響を周期比 α に簡易に考慮可能とするため、それぞれの固有周期を非線形化程度で補正する方法を検討した。構造物の非線形化を表す指標としては応答塑性率 μ_s を用いた。地盤に対しては、最大変位 $\delta_{\max}$ を規準変位 δ_r で正規化したものを地盤の応答塑性率 μ_g として定義し、これを非線形化の程度を表す指標とすることを提案した。
- (3) 地盤、構造物それぞれの応答塑性率 μ_s, μ_g を用いて、固有周期を補正する簡易な式の整理を行い、両者に同一の補正係数（具体的には換算係数 $\beta_s, \beta_g =$

0.65)を考慮することで、地盤、構造物が非線形した場合においても線形時の結果に近づくことを確認した。さらに、今回提案した手法によって補正係数 ν を算定することで、従来よりも高い精度で作用の組合せ係数を設定可能であることを確認した。

今回整理した方法を用いることで、これまで考慮していなかった地盤条件の違いに伴う非線形化程度の変化や、構造物の非線形化の程度を考慮した上でのより適切な慣性力と地盤変位の組合せの補正係数 ν の設定が可能となり、結果として耐震設計の高度化、合理化が期待される。

ただし本検討では、地盤、構造物のいずれか一方を非線形とした検討に留まっている。またそれぞれの非線形化に伴う周期の変化は補正しているが、減衰の変化による影響等は無視している。さらに、実際の構造物を対象とした妥当性の検討、設計への影響等も含めて今後さらに検討を実施する予定である。

文 献

- 1) 国土交通省鉄道局監修，鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説（耐震設計），丸善出版，2012
- 2) 日本国有鉄道：耐震設計指針（案）解説，1983
- 3) 室野剛隆，西村昭彦：杭基礎の耐震設計における地盤変位と慣性力の組合せ，第3回地震時保有耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，1999
- 4) 田村修次，藤森健史，勝二理智，三町直志，眞野英之，内田明彦，船原英樹，関口徹：応答変位法における地盤変位と構造物慣性力の低減係数，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造I，pp.519-520，2012
- 5) 日本建築学会：建築基礎構造設計指針，2019
- 6) 田中仁規，坂井公俊：鉄道の耐震設計における慣性力と地盤変位の組合せ係数の改良－線形状態での検討－，土木学会論文集，Vol.80，No.13，論文ID：23-13119，2024
- 7) 田中仁規，坂井公俊：線形領域における地盤の固有周期が応答変位法に用いる慣性力と地盤変位の組合せに及ぼす影響，鉄道総研報告，Vol.39，No.3，pp.39-45，2025
- 8) 田中仁規，坂井公俊：地盤と構造物の非線形化を考慮した応答変位法における作用の組合せ係数の改良，日本地震工学会論文集，Vol.25，No.4，pp.62-73，2025
- 9) 坂井公俊：大規模地震時の地表面地震動を効率的に評価するための標準地盤データの提案，土木学会論文集，Vol.79，No.13，論文ID：22-13001，2023
- 10) 室野剛隆，野上雄太：S字型の履歴曲線の形状を考慮した土の応力～ひずみ関係，第12回日本地震工学シンポジウム論文集，pp.494-497，2006
- 11) 福島美光，翠川三郎：周波数依存性を考慮した表層地盤の平均的な Q^{-1} 値とそれに基づく地盤増幅率の評価，日本建築学会構造系論文集，第460号，pp.37-46，1994
- 12) 坂井公俊，室野剛隆：地盤の等価1自由度モデルを用いた非線形動的解析法の提案，土木学会論文集A1（構造・地震工学），Vol.71，No.3，pp.341-351，2015
- 13) 坂井公俊，井澤淳，室野剛隆，日野篤志：地盤全体系の強度指標の提案とその簡易推定法に関する検討，日本地震工学会論文集，Vol.15，No.7，pp.22-33，2015
- 14) 坂井公俊，野上雄太：地盤全体系の強度と入力地震動の最大値を考慮した表層地盤の地震増幅率の高精度化，土木学会論文集A1（構造・地震工学），Vol.73，No.4，pp.I_170-I_179，2017
- 15) 杉浦翔太，野上雄太，丹羽健友，田中浩平，坂井公俊：表層地盤の強度と入力地震動最大値を考慮した各種地震動指標の地震増幅率の高度化，土木学会論文集A1（構造・地震工学），Vol.77，No.4，pp.I_154-I_163，2021
- 16) 坂井公俊，井澤淳，室野剛隆：地盤全体系の強度と固有周期を用いた耐震設計のための地盤分類法，土木学会論文集A1（構造・地震工学），Vol.73，No.2，pp.433-442，2017
- 17) 坂井公俊，井澤淳，石橋利倫：地盤全体系の強度を考慮した地震時地盤変位量の簡易推定法，土木学会論文集A1（構造・地震工学），Vol.74，No.4，pp.I_361-I_368，2018
- 18) 田蔵隆，佐藤正義，清水勝美，小山和夫，渡辺修：地層分割数および有効ひずみ換算係数が地盤の非線形地震応答解析結果に及ぼす影響に関する基礎的検討，第22回土質工学研究発表会，pp.64-67，1987

耐震設計上の基盤面と表層地盤の相互作用が卓越周期に与える影響

坂井 公俊*

Effect of Interaction between Bedrock and Surface Layer on the Predominant Period of Surface Layer

Kimitoshi SAKAI

A study was conducted to understand the effect of engineering bedrock on the predominant period of surface layer. The results confirmed that even when the natural period T_g derived from eigenvalue analysis is the same, the interaction with engineering bedrock can cause significant changes in the predominant period and ground motion. Additionally, it was clarified that the influence of engineering bedrock is likely to shorten the predominant period compared to T_g when the natural periods of the first and second modes from eigenvalue analysis are relatively close or when the shear stiffness of the surface layer is relatively large. We have proposed a method to easily correct this tendency, and have confirmed that it can estimate the dominant period of the ground more accurately. It is expected that the insights obtained in this study will improve the accuracy with which the predominant period of ground during earthquakes can be estimated, and enable ground motion to be evaluated while taking into account the uncertainty of the predominant period.

キーワード：固有周期，卓越周期，耐震設計上の基盤面，表層地盤，地盤種別

1. はじめに

構造物の耐震設計では，構造物への地震作用，設計地震動を適切に設定することが重要である。近年の設計では，震源断層を特定した強震動予測やその他の手法によって設計地震動を評価，選択する事例が増えてきている^{例えは1)～5)}。その一方で，対象とする施設，条件等によっては標準的な設計地震動を用いる場合もある^{例えは6) 7)}。また，設計地震動を定義する位置としても，地表面位置で設定する場合⁶⁾や耐震設計上の基盤面位置で設定する場合⁷⁾など，いくつかのバリエーションが存在する。

いずれの場合においても，表層地盤の特性によって地表面位置の地震動特性が大きく変化することは以前より知られており^{例えは8) 9) 10)}，地上構造物の耐震設計を行う際には地点ごとに表層地盤の特性を個別に考慮，評価する必要がある。この時には，表層地盤を有限要素でモデル化した逐次非線形動的解析や周波数領域の解法によって地震動波形を算定する方法が有効である。その一方で，一般的な道路橋，鉄道構造物の耐震設計，耐震診断等では表層地盤の固有周期 T_g によって地盤を分類し，これに応じて地表面位置の地震動波形を選択する方法が一般に用いられている（表1，表2）^{6) 7)}。

地盤の固有周期 T_g は，固有値解析やいわゆる4分の1波長則などのような簡易な手法によって算定することができる。このうち固有値解析では基盤よりも下層を固

定条件で計算することになり，基盤との相互作用は一般に無視している。また4分の1波長則においても基盤の影響は無視することになる。

その一方で，例えば鉄道構造物の耐震設計における設計地震動は，解放基盤面での波形として評価されている^{7) 11)}。そのため，各地点の反射波の影響を適切に考慮するための地盤モデルとしては，基盤も考慮した上で地表面地震動を算定する必要がある。この時の地盤の固有

表1 道路橋の設計時に用いる地盤分類⁶⁾

地盤種別	地盤の基本固有周期 $T_G(s)$
I 種	$T_G < 0.20$
II 種	$0.20 \leq T_G < 0.60$
III 種	$0.60 \leq T_G$

表2 鉄道構造物の設計時に用いる地盤分類⁷⁾

地盤の固有周期 $T_g(s)$	地盤種別	備考
—	G0 地盤	岩盤
—	G1 地盤	基盤
~0.25	G2 地盤	洪積地盤など
0.25~0.5	G3 地盤	普通地盤
0.5~0.75	G4 地盤	普通~軟弱地盤
0.75~1.0	G5 地盤	軟弱地盤
1.0~1.5	G6 地盤	軟弱地盤
1.5~	G7 地盤	極めて軟弱な地盤

* 鉄道地震工学研究センター 地震応答制御研究室

周期 T_g は、基盤との相互作用も含んだ上での地震増幅の卓越周期となっている必要があるが、現状ではこの影響は無視している。鉄道構造物の耐震設計上の基盤面としては、① $V_s=400\text{m/s}$ 以上の比較的強固な連続地層であることに加えて、基盤との相互作用の影響が小さくなるような配慮として、②上層との V_s の差が十分に大きく、下層との V_s の差が小さいこと、も条件として明記されている⁷⁾。しかしながら、実際の地盤調査において上記②を満足するような地層まで調査している事例は限定的であり、これが地震増幅の卓越周期に与える影響を整理しておく必要がある。

下端の境界条件、最表層と基盤のインピーダンス比によって応答倍率が大きく変化することは以前からよく知られているものの、基盤との相互作用が表層地盤の固有周期 T_g に与える影響を定量的に評価した事例はほとんど見当たらない。その一方で固有周期 T_g の評価は、地表面地震動の卓越周期の評価と関係が深いので、地上構造物の耐震設計を考える上では非常に重要な指標である。

そこで本稿では、基盤との相互作用が地震増幅の卓越周期に与える影響を把握することを目的とした検討¹²⁾ に関して報告する。具体的には2章においてサンプル地盤を対象に固有値解析、周波数応答解析等を実施する事で、モデル下端の境界条件の違いによる固有周期 T_g の変化の可能性について整理を行う。続いて3章では、多数の地盤に対して同様の検討を実施する事で、固有周期 T_g が変化する可能性のある条件を整理するとともに、これを簡易に特定、補正する手法を提案する。

ここで設計地震動を定義する地盤面に関して、基盤で解析領域を分離して地震動を設定する問題点を指摘する事例¹³⁾ もある。これについて、現在の設計における取り扱い^{例えば7)} を重視して、本検討では共通した地震動を基盤位置で設定することとする。またこの時に想定する地震動レベルとしては、鉄道構造物の耐震設計で用いている L1 地震動⁷⁾ のような比較的振幅レベルの小さな地震動を対象とする。地震動の振幅レベルがより大きくなると、地盤の非線形挙動の大小や地盤の強度特性が地表

面地震動の評価、分類には重要となる^{例えば14) 15)} が、今回は比較的振幅レベルが小さな地震動を対象としているため、地盤の非線形挙動よりも弾性時の地震増幅のピーク周期に着目した議論を行う。

なお、地盤の固有周期 T_g は、下端固定条件での固有値解析によって算定される1次固有周期を指すことが一般的であると思われるが、本検討では各種手法によって算定される1次のピーク周期、地震増幅のピーク周期（卓越周期）も T_g で表現することとする。また本検討では基盤よりも上層の地盤のみを取り扱うこととし、以降で述べる基盤は全て耐震設計上の基盤面を指している。

2. 耐震設計上の基盤面が地盤の卓越周期 T_g に与える影響

ここでは地層構成の異なるサンプル地盤を対象として、各種手法によって地盤の卓越周期 T_g を算定する。この結果から、基盤の境界条件の設定方法によって T_g が変化する可能性があること、地表面地震動の特性が大きく変化する可能性があることを示す。検討に用いるのは図1に示す2地盤（地盤A、地盤B）とした。まず、地盤A、Bを対象に固有値解析を実施した結果を表3、表4に示す。固有値解析を実施する場合にはモデル下端を固定条件としているため、基盤との相互作用は無視した結果である。これを見ても分かるように、今回検討に用いた地盤A、地盤Bはともに固有周期 $T_g=0.572$ 秒と同一の値となっている。これを鉄道構造物の耐震設計時に用いる地盤種別⁷⁾（表2）で考えると、いずれも G4 地盤に該当する。なおこの2地盤は、次章で検討を行う多数の地盤データベースの中から固有周期 T_g が同一になる地盤を抽出したものである。

この地盤A、Bを対象に周波数応答解析を実施する。この時には基盤の影響を考慮することとし、基盤として設定した地盤（ $V_s=400\text{m/s}$ 、 $\gamma=20\text{kN/m}^3$ ）が半無限に連続するものとして表層地盤の伝達関数を計算する。地盤の減衰は地盤のせん断弾性波速度、土質分類をパラ

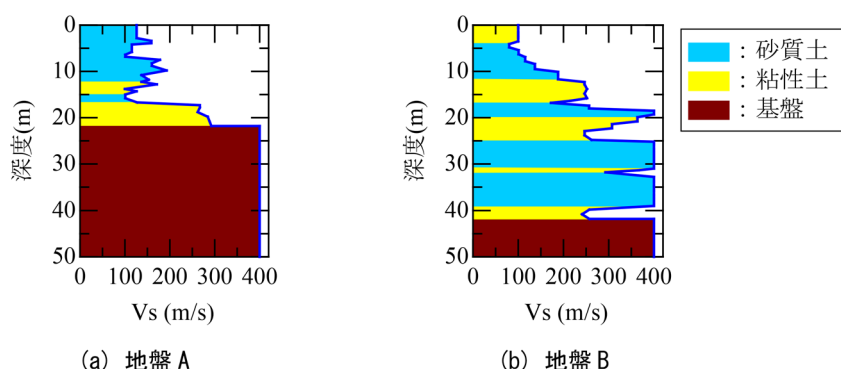


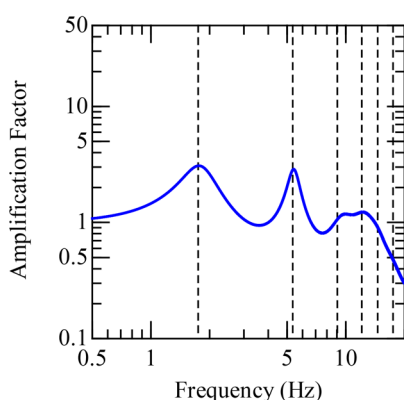
図1 検討に用いる地盤の速度構造、土質分類

表 3 固有値解析結果（地盤 A）

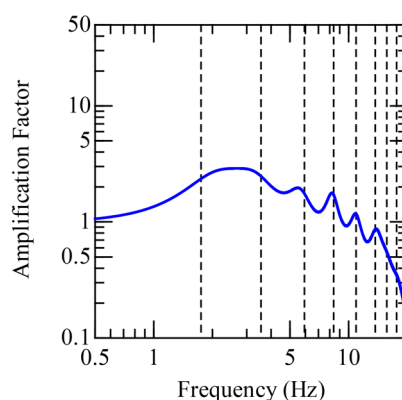
次数	周波数 (Hz)	周期 (s)	刺激係数 P.F.	有効質量比 (%)
1	1.75	0.572	4.906E+00	73.41
2	5.34	0.187	1.390E+00	5.89
3	9.05	0.110	1.599E+00	8.38
4	12.08	0.083	-1.109E+00	3.81
5	14.58	0.069	9.494E-01	2.67

表 4 固有値解析結果（地盤 B）

次数	周波数 (Hz)	周期 (s)	刺激係数 P.F.	有効質量比 (%)
1	1.75	0.572	-6.653E+00	69.81
2	3.55	0.282	-3.454E+00	18.53
3	5.93	0.169	-1.993E+00	6.55
4	8.38	0.119	-1.024E+00	1.74
5	10.92	0.092	6.761E-01	0.73



(a) 地盤 A

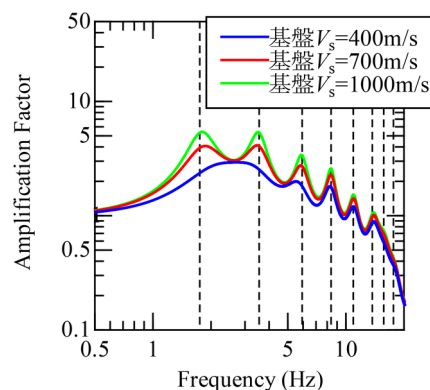


(b) 地盤 B

図 2 周波数応答解析結果（基盤の影響を考慮した場合）

メータとして周波数依存性を考慮した Q 値の提案式¹⁶⁾に出来る限り一致するようなレーリー減衰を設定している¹⁷⁾。この条件に基づいて周波数応答解析を実施した結果を図 2 に示す。なおこの図には固有値解析によって得られた各モードの固有振動数を縦点線で示している。これを見ると、地盤 A（図 2 (a)）では固有値解析による 1 次、2 次振動数において明瞭なピークが見られる。その一方で地盤 B（図 2 (b)）では 1 次、2 次固有振動数のいずれにおいてもピークは見られない一方で、その間（2.5Hz 程度）にピークが存在している。この卓越周波数 2.5Hz は 0.4 秒であり、これを地盤の固有周期だと考えると、表 2 の地盤分類では G3 地盤に該当する。つまり固有値解析による地盤分類（G4 地盤）とは異なる結果が得られることになる。

続いてこの地盤 B を対象に、基盤のせん断弾性波速度を $V_s=400\text{m/s}$ 、 700m/s 、 1000m/s と段階的に変化させた条件において周波数応答解析を実施した結果を図 3 に示す。この結果より、基盤を $V_s=700\text{m/s}$ 以上とした条件では、1 次、2 次のピークとも固有値解析で得られた固有周期と良好に一致していることが分かる。固有値解析はモデル下端を固定条件で解いており、当然のように基盤 V_s を非常に大きな値としていることと同義であるため、基盤 V_s を大きく設定することで、固有値解析の結果と同一の周期が卓越する結果が得られている。こ

図 3 基盤の V_s を変化させた条件での周波数応答解析結果（地盤 B）

れが基盤との相互作用による影響であり、地盤 B のような地盤では、固有値解析によって得られた卓越周期とは異なる周期における増幅が大きくなる場合があることが分かる。

3. 地震動の卓越周期が耐震設計上の基盤面の影響を受ける条件の整理

3.1 解析の条件

本章では、多様な地層構成を有する地盤に対して前章

と同様の検討を行う事で、基盤の存在によって地盤の卓越周期が変化する条件の整理を行う。ここでは、検討に用いる地盤情報と解析条件について示す。

対象とする地盤は、全国の地盤調査結果を統一的な指標で抽出、整理、解析モデル構築まで行ったデータベース¹⁸⁾を用いることとする。ただし、この後の分析における解析精度を保つため、固有値解析に基づく地盤の1次固有周期 T_g が0.05～2.0秒の範囲のデータ、地盤の分割数が10分割以上のデータのみを抽出して用いる。結果として、全108,730地点の地盤情報を用いて分析を行っている。

これら全データを用いて解析的な検討を行う。この時には、前章と同様に固有値解析と周波数応答解析を実施する。なお周波数応答解析を実施する際には、モデル下端に $V_s=400\text{m/s}$ 、 $\gamma=20\text{kN/m}^3$ の基盤が半無限に続くと仮定し、得られる周波数応答関数の1次ピークを地盤の固有周期、卓越周期とした。なお当然ではあるが、下端固定条件での周波数応答解析によるピーク周期と固有値解析による固有周期がほぼ一致することは別途確認している。

以降では、固有値解析によって得られる基盤の影響を無視した固有周期を T_g^{E+F} 、周波数応答解析による基盤の影響を考慮した固有周期を T_g^{2E} とあらわす。これとともに、現時点でも地盤の固有周期を推定する手法として用いられることのある式(1)による簡易算定法による評価も実施し、これを T_g^S とあらわす。この T_g^S による結果は、簡易法の精度を大まかに把握することが目的であるため、3.3節以降の詳細な分析では取り扱わない。

$$T_g^S = \sum \frac{4H}{V_s} \quad (1)$$

3.2 各種手法による地盤の卓越周期 T_g の算定結果

前節の条件に基づいて、各手法による地盤の固有周期 T_g^{E+F} 、 T_g^{2E} 、 T_g^S を算出した。これら固有周期のうちど

れを正解と捉えるかは様々な考え方ができるが、本検討では「解放基盤位置で設計地震動が規定された際の地震増幅のピーク周期」を把握する事を中心に考えることとし、 T_g^{2E} を正解値として考えることとする。

まず、各手法による固有周期 T_g の算出結果を比較したものを図4に示す。なおこれらの図には、鉄道構造物の耐震設計における地盤種別の区分(表2)⁷⁾も補助線で示すとともに、G2～G7を記載している。これを見ると、各手法による固有周期 T_g は調和的で、概ね1:1の直線に乗る結果となっている。そのため地盤の硬軟の傾向を表現する手法としては、各手法とも有効であることが分かる。その一方で図4(b)を見ると、式(1)を用いた簡易法に基づく T_g^S は T_g^{2E} とのばらつきが多少大きくなっているとともに、全体的な傾向としては T_g^S の方が固有周期を長めに評価していることが分かる。設計地震動の一般的な傾向として、地盤の固有周期が長いと地上構造物への慣性力は相対的に小さくなる傾向がある⁷⁾ため、式(1)によって地盤の固有周期を算定する場合には、この点も留意する必要があると言える。

固有値解析によって得られる T_g^{E+F} の有効性を示す図4(a)の結果はほぼ1:1の直線上にあるため、簡易法による固有周期 T_g^S の結果と比較すると T_g^{E+F} は相対的に高い精度を有していると言える。ただし、条件によっては T_g^{2E} と多少異なる固有周期となる地盤も存在し、全体的な傾向として T_g^{E+F} の方が固有周期を長めに評価している結果が散見される。

図4の結果を見ると、各手法による固有周期 T_g の算定結果の違いによって、各図に補助線で示した表2の地盤種別の区分を跨ぐような地盤も存在する。 T_g^{2E} による地盤種別を正解とすると、異なる地盤種別と判定される割合は、簡易法による T_g^S を用いた場合は17.0%、固有値解析による T_g^{E+F} を用いた場合は3.2%であった。そのため、これらの手法による固有周期 T_g を用いて、地盤種別の判定や設計地震動の設定を行う際には、得られる結果に誤差が含まれることを認識した上で適切な対応

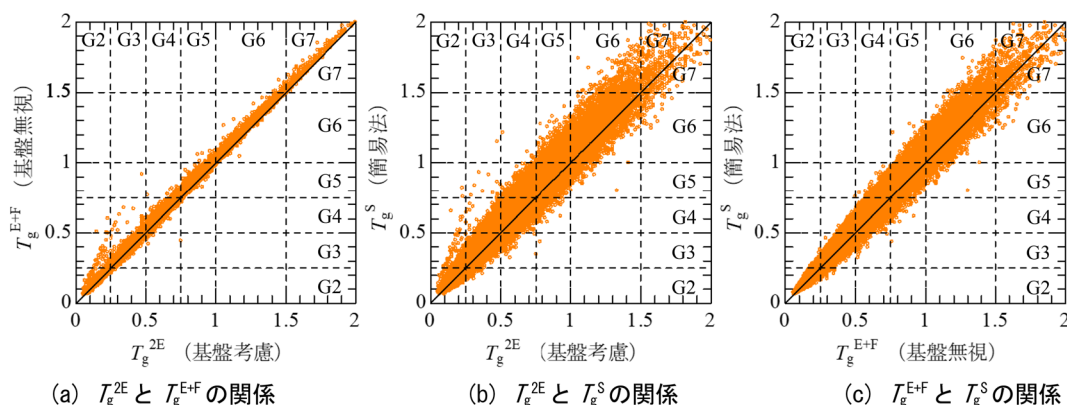


図4 各手法による地盤の固有周期 T_g の比較

を行う必要があると言える。

3.3 耐震設計上の基盤面の影響によって卓越周期が変化する条件の把握

ここでは、基盤の影響を無視した固有周期 T_g^{E+F} が地震動の卓越周期 T_g と異なる条件を把握するための検討を行う。前章の検討結果より、地盤Bでは基盤との相互作用によって、1次モードと2次モードの中間的な周波数でピークが見られる。また地盤Aと地盤Bを比較すると、地盤Bの方が2次モードの固有振動数が小さくなっており、1次モードにより近接していることが分かる。そのため、1次モードと2次モードの固有周期の比率によって基盤の影響の大小が表現できると考えて、各地盤の整理を行った。

横軸に固有値解析による1次モード固有周期 $T_g(1)^{E+F}$ と2次モード固有周期 $T_g(2)^{E+F}$ の比率を、縦軸に周波数応答解析による基盤の影響を考慮した固有周期 T_g^{2E} と固有値解析による1次モード固有周期 $T_g(1)^{E+F}$ の比率を取った結果を図5に示す。この図には、横軸を一定間隔毎に分割したデータの平均と標準偏差も示している。これを見ると、固有値解析による固有周期の比率 $T_g(1)^{E+F}/T_g(2)^{E+F}$ が大きい条件では縦軸 (T_g^{2E}/T_g^{E+F}) が概ね1.0となっており、基盤の影響はほとんど受けていないことが分かる。またこの領域では、 T_g^{2E}/T_g^{E+F} が1.0よりも小さくなる結果も散見されるが、これは地盤の減衰の影響で固有周期が多少変化する現象によるものであることを確認しており、本検討の対象としては取り扱わない。その一方で、 $T_g(1)^{E+F}/T_g(2)^{E+F}$ が2.5程度よりも小さくなると徐々に縦軸が1.0よりも大きくなっており、基盤の影響を無視することで固有周期を長めに評価してしまっている。また各結果のバラツキはそれほど大きくないため、固有値解析による1次モードと2次モードの固有周期の比率によって基盤の影響の大小を適切に抽出できる事が確認された。

また前章の検討(図3)でも見られたように、基盤と表層地盤の剛性差が小さいほど、基盤との相互作用の影響が大きくなりやすいと考えられる。また当然のように、表層地盤の中ではより深部の剛性が重要な意味を持っていると考えられる。そこで、最下層から一定の範囲における平均S波速度 V_s^{ave} を算定し、この変化に対する正解値の固有周期との比率 T_g^{2E}/T_g^{E+F} の変化を整理した。この時に、最下層の V_s 、最下層から3, 5, 10mの V_s^{ave} 、表層地盤全体の V_s^{ave} をそれぞれ一定の範囲で分割し、図5と同様の表現でプロットし比較した。各結果は紙面の都合上省略するが、最下層から10mにおける V_s^{ave} で分割することで、各結果を比較的明瞭に区分することができた(図6)。図6より、平均 V_s が大きいほど横軸 ($T_g(1)^{E+F}/T_g(2)^{E+F}$) の変化に伴う縦軸 (T_g^{E+F}/T_g^{2E})

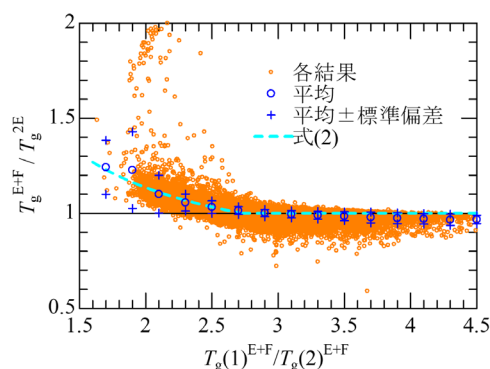


図5 1次/2次モード固有周期比と正解値の固有周期比の関係

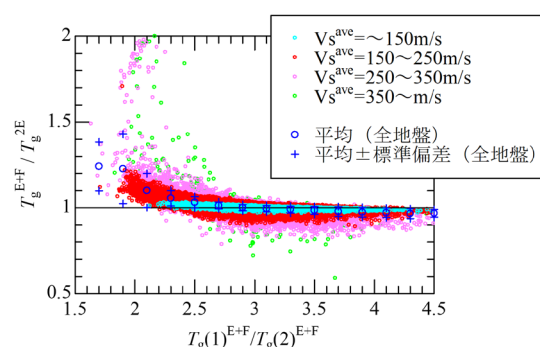


図6 V_s^{ave} (最下層から10mの平均 V_s) の変化に伴う正解値との固有周期の比率

T_g^{2E}) の変化が顕著になっており、基盤の影響が相対的に大きくなることが分かる。

以上より、表層地盤、特に下端から10mの平均 V_s が比較的大きく、かつ固有値解析による1次モードと2次モードの固有周期が比較的接近している地盤では、基盤の影響によって卓越周期が変化する可能性が高くなるという傾向が確認された。

3.4 耐震設計上の基盤面の影響を含む固有周期 T_g の簡易な補正方法

前節の検討により、基盤の影響によって地盤の卓越周期が変化する可能性のある条件の抽出を行った。このような地盤においては、基盤の影響を考慮した周波数応答解析等を実施する事で、この影響も適切に含んだ上での卓越周期 T_g を算定することができる。その一方で、鉄道橋りょう・高架橋の耐震設計に一般に用いられているJRSNAPでは固有値解析機能はあるものの周波数応答解析機能は存在しない等、設計に用いることのできるツールの制約等が存在する。また橋梁の設計者が全て地震時地盤挙動に対する深い知見を有しているとは限らない現状もある。このように、実務設計においては地盤の周波数応答解析を容易に実施、解釈できない状況も存在

する。このような場合に適用可能な基盤の影響の簡易補正方法について整理を行う。具体的には図6の平均的な傾向を次式によって表現することを試みる。

$$R(T_g^{E+F}/T_g^{2E}) = T_R^{-1.2} + 0.7 \quad (2)$$

(ただし、 $R(T_g^{E+F}/T_g^{2E}) \geq 1.0$)

ここで、 $R(T_g^{E+F}/T_g^{2E})$ ：固有値解析による1次モード固有周期 T_g^{E+F} を補正する係数で、基盤の影響を考慮した固有周期 T_g^{2E} との比率（補正倍率）、 T_R ：固有値解析による1次、2次固有周期の比率である。この式(2)による補正係数も図5に点線でプロットしているが、青丸で示した1次/2次固有周期比と基盤の影響による固有周期比の平均的な傾向を大まかに表現できている。また図7の結果より、今回は最下層から10mの平均 V_s が150m/sよりも大きな地盤のみを対象として補正を実施することとした。

前節までで実施した全地盤を対象に、固有値解析によって得られる固有周期 T_g^{E+F} を式(2)によって補正した結果を図7、図8に示す。これらの図には、それぞれ補正前の結果も示しているが、いずれも式(2)という簡易な補正式を用いることで、基盤を考慮した固有周期により近い結果を得ていることが分かる。また、基盤の影響を考慮した条件と異なる地盤種別と判定される割合は、補正前の3.2%から補正によって2.1%となり、この方法を用いることで地盤種別の分類精度も向上することを確認した。

その一方で、依然としてこの方法を用いた場合にも卓越周期 T_g^{2E} と比較的大きな差が含まれる地盤も存在する。このような条件を特定し、さらに補正を行う事も考えられるが、提案手法は固有周期の簡易な補正方法に位置づけられるため、今回はこれ以上の補正手法の検討は行わないこととする。そのため、提案手法を用いて固有周期の補正を行った場合にも、得られる結果には多少の誤差が含まれることを念頭に置いて、その後の地震動評価、構造物の挙動評価を行う必要がある。

4. まとめ

地震時の地盤挙動を簡易かつ適切に評価するための基礎的な検討として、地盤の卓越周期に与える耐震設計上の基盤面の影響を把握するための解析を実施した。本検討で得られた知見を以下に示す。

- ・下端を固定とした条件での固有値解析による固有周期が同一となる2地盤に対して周波数応答解析、地震応答解析を実施する事で、表層地盤の伝達関数、地表面地震動の算定を行った。その結果、固有値解析による

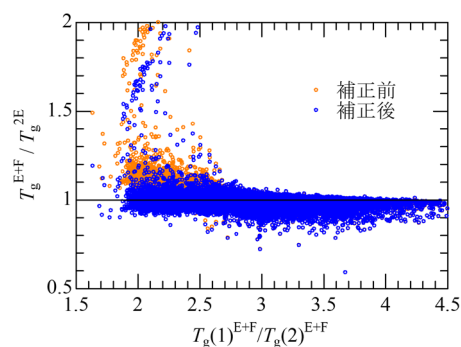


図7 固有値解析に基づく固有周期 T_g^{E+F} の補正結果
(1次/2次固有周期比—正解値との比率の関係)

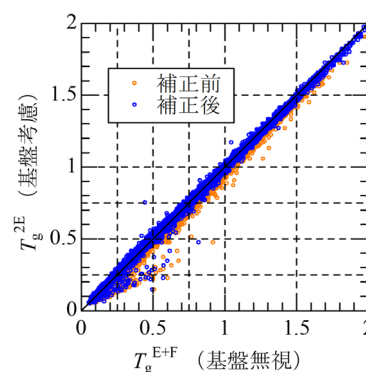


図8 固有値解析に基づく固有周期 T_g^{E+F} の補正結果
(基盤の影響を考慮した T_g^{2E} との比較)

固有周期が同一であっても、基盤との相互作用によって卓越周期や地表面地震動が大きく変化するケースが存在する事を確認した。

- ・多様な地層構成を有する地盤に対して固有値解析、周波数応答解析を実施する事で、基盤の影響による固有周期変化の傾向を確認した。その結果、基本的には固有値解析による固有周期は、基盤の影響を考慮した場合の卓越周期と調和的な傾向となるが、条件によっては基盤の影響によって固有値解析による周期よりも短周期側に卓越周期が移行するケースが散見されることを明らかにした。
- ・基盤の影響によって卓越周期が変化する可能性のある条件を把握するための整理を行った。その結果、固有値解析による1次モードと2次モードの固有周期が比較的接近している場合、表層地盤のせん断剛性が相対的に大きな場合には、基盤の影響によって卓越周期がより短くなる可能性が高いことを明らかにした。さらにこの傾向を簡易に補正する手法を提案し、これによって従来よりも適切に地盤の卓越周期を推定可能であることを確認した。

なお、いわゆる4分の1波長則、固有値解析、今回提案した簡易補正手法を用いた場合の鉄道標準に基づく

地盤種別⁷⁾の推定誤差はそれぞれ17.0%, 3.2%, 2.1%であり、これら手法を用いて固有周期の推定、地表面設計地震動の選定を行う場合には、この影響も考慮する必要がある。さらに今回の検討により、基盤の影響で卓越周期が変化する可能性の高い条件が明らかになった。そのためこのような条件に該当する地盤においては、基盤の影響も加味した上での卓越周期評価を検討することも重要である。

また、本検討では地盤の固有周期、卓越周期に主眼を置いた整理を行ったが、地震時の地盤増幅という観点では周期だけでなく応答倍率も重要な指標である。これについては、今後も引き続き検討を行う。

文 献

- 1) Joyner, W. B. and Boore, D. M.: Measurement, characterization, and prediction of strong ground motion, *Earthquake Engineering and Soil Dynamics II*, pp. 1-60, 1988.
- 2) 平野敏彦, 長沼敏彦, 西岡勉, 鈴木直人, 藤野秀隆: 地域特性を考慮した設計地震動の検討及びシールドトンネル縦断方向の耐震検討, 土木学会地震工学論文集, Vol.28, 論文番号 39, 2005
- 3) 土岐憲三, 岸本英明, 古川秀明, 酒井久和: 花折断層による京都盆地の3次元非線形有限要素法による強震動予測, 日本地震工学会論文集, 第7巻, 第5号, pp.45-59, 2007
- 4) Katsanos, E. I., Sextos, A. G. and Manolis, G. D.: Selection of earthquake ground motion records: A state-of-the-art review from a structural engineering perspective, *Soil dynamics and earthquake engineering*, Vol.30, Issue 4, pp.157-169, 2010.
- 5) 長尾毅, 末富岩雄, 福島康宏, 今村年成, 北原武嗣: 性能設計体系における新たな耐震設計事例－設計地震動－, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.73, No.4, pp.I_832-I_840, 2017
- 6) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, 2017
- 7) 国土交通省鉄道局監修 鉄道総合技術研究所編: 鉄道構造物等設計標準・同解説 (耐震設計), 丸善出版, 2012
- 8) Borchardt, R. D., and Glassmoyer, G.: On the characteristics of local geology and their influence on ground motions generated by the Loma Prieta earthquake in the San Francisco Bay region, California, *Bulletin of the seismological society of America*, Vol.82, No.2, pp.603-641, 1992.
- 9) 翠川三郎, 松岡昌志, 作川孝一: 1987年千葉県東方沖地震の最大加速度・最大速度にみられる地盤特性の評価, 日本建築学会構造系論文報告集, 第442号, pp.71-78, 1992
- 10) 藤川智, 先名重樹, 藤原広行, 大井昌弘: 2004年新潟県中越地震の強震観測点における表層地盤の地震動増幅, 日本地震工学会論文集, 第6巻, 第3号, pp.27-42, 2006
- 11) 坂井公俊, 室野剛隆, 佐藤勉: 近年の地震記録に基づいたL2地震動の考え方とその設定方法, 鉄道総研報告, Vol.25, No.9, pp.5-12, 2011
- 12) 坂井公俊: 工学的基盤と表層地盤の相互作用が地震増幅の卓越周期に与える影響, 土木学会論文集, Vol.81, No.13, 2025
- 13) 吉田望, 篠原秀明, 澤田純男, 中村晋: 設計用地震動の設定における基盤の意義, 土木学会地震工学論文集, Vol.28, 論文番号 170, 2005
- 14) 坂井公俊, 井澤淳, 室野剛隆: 地盤全体系の強度と固有周期を用いた耐震設計のための地盤分類法, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.73, No.2, pp.433-442, 2017
- 15) 坂井公俊, 井澤淳, 石橋利倫: 地盤全体系の強度を考慮した地震時地盤変位量の簡易推定法, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.74, No.4, pp.I_361-I_368, 2018
- 16) 福島美光, 翠川三郎: 周波数依存性を考慮した表層地盤の平均的な Q^{-1} 値とそれに基づく地盤増幅率の評価, 日本建築学会構造系論文集, No.460, pp.37-46, 1994
- 17) 坂井公俊, 室野剛隆, 桐生郷史: 地表位置の距離減衰式から基盤位置の地震動を推定する簡易手法, 構造工学論文集 A, Vol.57A, pp.332-339, 2011
- 18) 坂井公俊: 大規模地震時の地表面地震動を効率的に評価するための標準地盤データの提案, 土木学会論文集, Vol.79, No.13, 論文 ID: 22-13001, 2023

ダイヤ乱れ時にも利用可能な 列車混雑区分予測モデルの実装と検証

上田 寛人* 中挾 晃介* 國松 武俊*

An Implementation and Verification on a Model for Predicting Level of Train Congestion during Disruptions

Hiroto UEDA Kosuke NAKABASAMI Taketoshi KUNIMATSU

In recent years, train operators have started to provide real-time information on the levels of congestion on trains to improve customer satisfaction. However, during disruptions such as train service cancellations or schedule changes, the levels of congestion are different from the norm. At such times, it would be beneficial for passengers to receive information about future congestion, since it would help them decide whether or not to change trains. In this study, we developed a model to predict congestion levels during disruptions. The test of the developed model confirmed that it was possible to predict the level of congestion with around 75 % accuracy by using features such as the level of congestion at one to three stations and the headway ahead of the train.

キーワード：混雑予測，機械学習，勾配ブースティング決定木，ダイヤ乱れ

1. はじめに

現在、各鉄道事業者は利用者満足度を向上させるため、利用者に対して列車内の混雑情報を提供している。しかし、運休や列車の順序変更等を伴うダイヤ乱れが発生すると、混雑状況が普段と異なる傾向となり、鉄道利用者が利用する列車を選択する際に、参考となる混雑情報が十分に提供できていない。よって、ダイヤ乱れ時の各列車の各駅間での列車混雑を予測し、その情報を提供するサービスがあれば、利用者が混雑を避けて、自宅を出る時間を遅らせるなど、普段と異なる列車を利用する行動が可能となり、旅客の快適性低下の防止に繋がると考えられる。

そこで本研究では、乗車率に応じて、混雑の度合いをいくつかの区分に分け（以下、混雑区分と呼ぶ）、勾配ブースティング決定木を採用した機械学習フレームワーク上で、ダイヤ乱れ時の各列車の各駅間での混雑区分を予測するモデルの構築を試みた。具体的には、混雑区分に影響を及ぼすと考えられる運転再開からの経過時間や列車の運行間隔、先行列車の混雑区分、予測対象列車における予測対象駅の1～3駅前の混雑区分を特徴量とする予測モデルを構築し、その精度を検証した。

本稿の構成は以下の通りである。第2章では、公共交通機関における混雑予測に取り組んだ先行研究について述べる。第3章では、予測モデルの構築にあたって使用したデータセット、作成した特徴量などを説明する。第4章では、テストデータと予測結果を示し、結果に対する考察を述べる。まとめと今後の課題については、第5

章で述べる。

2. 先行研究

公共交通機関における混雑率および混雑区分の予測については多くの研究がなされている。特に、近年は機械学習手法を用いたものが多く報告されており、ニューラルネットワークを用いたものとして El Maazouzi ら¹⁾、中挾ら²⁾、サポートベクタマシンを用いたものとして Yang³⁾ ら、勾配ブースティング決定木を用いたものとして Wang⁴⁾ ら、Jamar ら⁵⁾、Gallo ら⁶⁾、山城ら⁷⁾ がある。

上記の文献は平常時を対象としているものが多く、ダイヤ乱れ時の混雑率あるいは混雑区分予測を扱った文献は極めて少ない。山城ら⁷⁾ は、30分以上の大きなダイヤ乱れ時を対象に、過去の運転整理ダイヤと乗車人数を学習データとして15分先の旅客流動波形を予測する手法を開発し、流動量を平均約75%の精度で予測できたとしている。ただし、山城らのモデルは、ダイヤ乱れの発生から2時間先までの駅間の断面輸送量を15分単位で予測するものであった。つまり、各列車における各駅間の混雑区分を予測するものでなく、ある列車は非常に混雑しているが次の列車は空いているなど、列車別の情報を提供することは難しい。

このように、先行研究の成果を、ダイヤ乱れ時に各列車の各駅間での列車混雑予測情報を提供するサービスに活用することは困難と考えられる。したがって、本研究では、ダイヤ乱れ時の各列車の各駅間での混雑区分を予測するモデルの構築を目的とした。予測モデル構築にあたっては、多くの文献で使用されていた機械学習手法を用いることとし、学習データの特徴を把握したうえで、

* 信号技術研究部 運転システム研究室

有用と考えられる機械学習フレームワークを選定した。

3. 予測モデルの構築

本章では、ダイヤ乱れ時における列車の混雑区分を予測するモデル構築について述べる。予測モデルは、採用する機械学習フレームワーク、特徴量の2要素からなる。そこで、3.1節で、本研究で使用する学習データとその前処理およびデータの特徴を説明した後、3.2節で採用する機械学習フレームワーク、3.3節で特徴量について説明する。また、3.4節では、予測モデルの性能を評価するための評価指標について説明する。

3.1 学習データと混雑区分の作成

本研究の対象路線は、大都市圏に存在し、A駅～X駅の24駅で構成されている。当該路線では、普通や快速など複数種別の列車が運行され、他線との直通運転も実施されている。また、当該路線では、各列車について各駅単位で実績着発時刻や、発車時の乗車率などが毎日記録され、表1の指標からなるデータを得ることができる。

そこで本研究では、対象路線にて大規模なダイヤ乱れが発生した平日4日分のデータと、大規模なダイヤ乱れが発生しなかった、連続した平日54日分のデータを取得し、学習データを作成した。データ件数は590,376件であった。なお、列車ダイヤや旅客流動が異なる休日や祝日は、学習データには含んでいない。

本研究では混雑区分を予測することから、乗車率から混雑区分を算出する前処理を行った。図1は、混雑区分と、その区分における列車内の様子の一例を示したものである。乗車率から混雑区分を算出するにあたっては、乗車率0～25%以下を混雑区分1、以後25%区切りごとに混雑区分2、3、…、9とラベルづけを行った。なお、乗車率225%以上のものは混雑区分9に含めることとした。

このように作成した学習データを確認したところ、混雑区分8や9となるデータは、全体の1%にも満たなかった。したがって、本学習データは、混雑区分別のデータ数にばらつきがある不均衡データであり、それに適した機械学習フレームワークを選定する必要があることがわかった。

3.2 採用する機械学習フレームワーク

3.1節で述べたように、本研究では、不均衡データを取り扱う必要がある。また、今後、学習データを増やした場合にも対応できるよう、学習にかかる時間が短い手法の方が望ましい。そこで、本研究では、数多く存在する機械学習フレームワークの中からLightGBMを選定した。LightGBM⁸⁾とは、勾配ブースティング決定木を採用した機械学習フレームワークの一つであり、計算効

表1 データセットに含まれる指標の名称と型

指標名	指標の型
日付	文字列型
方向区分(上り線/下り線)	カテゴリ型
列車番号	カテゴリ型
列車駅順序(列車の始発駅からの駅数)	整数型
駅通過フラグ	真偽値型
当該駅名	文字列型
次駅名	文字列型
計画ダイヤ上の当該駅到着時刻	整数型
実績ダイヤ上の当該駅到着時刻	整数型
計画ダイヤ上の当該駅発車時刻	整数型
実績ダイヤ上の当該駅発車時刻	整数型
(当該駅発車時の)乗車率	浮動小数型

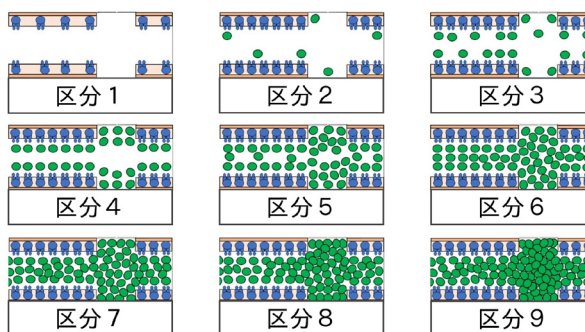


図1 乗車率を9段階に区分けして作成した混雑区分

率が良く、不均衡データに対する予測に優れるという特徴を持つ。勾配ブースティング決定木は、アンサンブル学習の一種であり、アンサンブル学習とは、単純な予測方法を多数組み合わせ、より精度の高い予測を目指す方法である。アンサンブル学習は、単純な予測方法に何を用いるか、あるいはその予測方法をどう組み合わせるかといった違いから、いくつかの種類が存在する。勾配ブースティング決定木は、単純な予測方法に決定木を用いる。最初の決定木が予測を行い、その予測誤差を修正するように、「予測誤差を予測する決定木」が次々に作成される。最終的な予測値は、これまでに作成した決定木の予測結果を加算したものとなる。

3.3 特徴量

混雑区分を精度良く予測するためには、表1に示した指標をそのまま使用するのではなく、予測に有用な指標を抽出したり、複数の指標を組み合わせる新しい指標を作成したりする操作が不可欠である。そこで本データセットの各指標を基に、先行研究も参考にしながら、表2に示す特徴量を作成した。

表2中の始発駅・終着駅とは、列車の始発駅と終着駅

表 2 作成した特徴量とその型

特徴量名	特徴量の型
方向区分	カテゴリ型
始発駅・終着駅	カテゴリ型
走行時間帯	カテゴリ型
走行駅間	カテゴリ型
着遅延	整数型
発遅延	整数型
先行列車との時間間隔	整数型
運転再開からの経過時間	整数型
先行列車の混雑区分	カテゴリ型
N 駅前の混雑区分(N = 1, 2, 3)	カテゴリ型
代替輸送可能フラグ	真偽値型

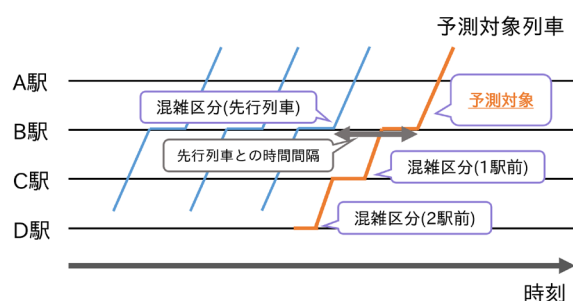


図 2 先行列車の混雑区分と予測対象列車の混雑区分例

のペアを表したものである。A 駅から X 駅まで走行する列車に対しては 0、X 駅から A 駅まで走行する列車に対しては 1 といったように、列車の始発駅・終着駅のペアに一対一対応する数字を設定することで、この特徴量を作成した。このような操作によって作成されたカテゴリ型の特徴量を、Label Encoding された特徴量という。なお、A 駅から X 駅まで走行する列車は 1、それ以外は 0、X 駅から A 駅まで走行する列車は 1、それ以外は 0 と設定して、カテゴリ型の特徴量を作成する方法も存在する。これは One-hot Encoding された特徴量という。LightGBM は、One-hot Encoding よりも、Label Encoding された特徴量の方が良い予測精度となることが知られているため⁹⁾、本研究では Label Encoding を採用した。

走行時間帯とは、列車が走行した時間帯を表したものである。ある列車が駅を 7:42 に出発した場合は 7、8:15 の場合は 8 と設定する。朝ラッシュ帯など同時帯に走行する列車は、似たような混雑区分となる傾向があるため、それらをまとめる目的で、本特徴量を作成した。

走行駅間とは、出発駅と到着駅のペアを表す。始発駅・終着駅特徴量と同様の考え方から、Label Encoding を行ってカテゴリ型の特徴量とした。

着遅延（発遅延）とは、ある列車の、ある駅における計画ダイヤ上の到着（出発）時刻と実績ダイヤ上の到着

（出発）時刻の差を秒単位で表したものである。着遅延と発遅延は、カテゴリ型の特徴量として扱うことも可能である。しかし、一般に、着遅延（発遅延）の値が大きくなれば、混雑区分も大きくなることから、遅延量の値そのものに関心がある。そこで、着遅延と発遅延は、値自体に意味を持たせるため、整数型の特徴量とした。

先行列車との時間間隔とは、ある列車における出発時刻と、その先行列車の出発時刻の差を秒単位で表したものである。先行列車との時間間隔が大きくなればなるほど、駅に滞留する乗客の数が増加し、列車に乗車する人数が増加すると考えられる。そこで、本特徴量は、着遅延と同様の考え方から、整数型とした。

運転再開からの経過時間とは、運転再開後に走行したある列車が、ある駅を出発した時刻から、運転再開時刻を減じたものを秒単位で表したものである。一般に、ダイヤ乱れ時の運転再開直後には、駅に滞留した乗客が一斉に列車に乗車することで混雑すると考えられ、運転再開から時間が経過すればするほど、平常時の混雑区分に戻っていくと考えられる。そこで、特徴量に、当該列車が運転再開直後から何秒後に走行したかを表す、運転再開からの経過時間を加えた。なお、本特徴量は、着遅延と同様の考え方から、整数型とした。

N 駅前の混雑区分とは、当該駅から数えて、N 駅前の当該列車の混雑区分をいう。例として、図 2 に、先行列車の混雑区分と、当該列車の 1～2 駅前の混雑区分を示す。

対象路線には、一部区間に、並行して別の路線が走行している。そこで、文献 5 で考案された、ある駅間に 2 系統以上の列車が走行しているかどうかを区別するための overlap 特徴量の考え方をを用いて、代替輸送可能フラグ特徴量を作成した。代替輸送可能フラグ特徴量とは、当該駅から次の駅へ、別の路線を使って代替輸送可能な場合は True、それ以外は False とする特徴量であり、駅間に別路線が走行しているかを表す。

3.4 評価指標

予測モデルの性能を定量的に評価するためには、予測モデルが出力した結果が、どれくらい正しいかを検証する予測精度計算が必要である。この予測精度の計算方法はいくつか知られているが、本研究では、正解率と Macro F1 値¹⁰⁾を用いる。

正解率とは、全予測のうち、正しく予測できたものの割合を表し、直感的にも理解しやすい標準的な指標である。一方、正解率は、特定のクラスのデータ数に大きな偏りがある場合、データ数の多いクラスの正解率に引っ張られてしまい、データ数の少ないクラスに対する予測精度を適切に反映することが難しい。つまり、本データのように、混雑区分別のデータ数に大きな偏りがある不均衡データの場合、正解率だけで予測性能を測定するこ

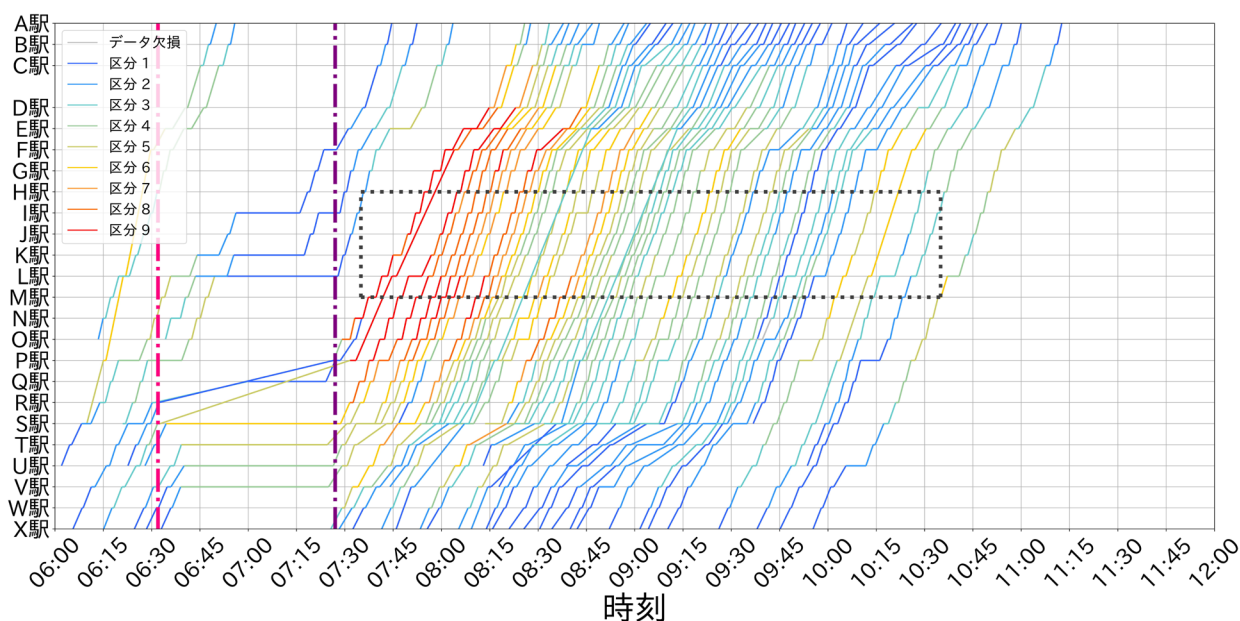


図3 混雑区分で着色された実績ダイヤ（灰色破線で囲った部分がテストデータ）

とは不十分であるといえる。

そこで、正解率に加えて、不均衡データに対する予測で良く用いられる Macro F1 値も計算することとした。Macro F1 値は、実際の混雑区分が1から6といった日常的に観測される場面の予測精度が高い場合でも、データ数が少ない混雑区分が8から9となる場面で正確に予測できない場合、値は低いままとなる。したがって、混んでいる状況も含めて、なるべく正確に予測できているかどうかを確認するための有効な指標と考えられる。

4. ケーススタディ

本章では、1つの実事例に対し、3章で構築した予測モデルの予測結果を提示し、予測精度や特徴量重要度、予測モデルの特性について述べる。4.1節ではテストデータ、4.2節では予測結果をそれぞれ説明する。

4.1 テストデータ

本研究の予測対象は、大規模なダイヤ乱れ時における列車の混雑区分である。したがって、3.1節で述べた学習データには含まれない、大規模ダイヤ乱れ事象1日分をテストデータ候補とした。図3は、テストデータ候補の実績ダイヤの一部（上り線、6:00から10:00までに出発する列車）を、混雑区分で着色しプロットしたものである。この図は、横軸が時刻、縦軸が駅、斜線1つ1つが各列車の運行を表している。本事例は6:32にQ駅にて人身事故が発生し、運転再開時刻は7:27であった。また、列車内の混雑区分が大きくなるほど、濃い赤色で着色した。ただし、混雑区分が欠損している場合は、灰

で着色した。

図3を確認したところ、ダイヤ乱れ時に課題となる具体的な混雑状況について、M駅にて

- ・大混雑のため、運転再開後の初列車から30分以上にわたって乗車が困難なケースがある
- ・大混雑した列車の到着後に、比較的空いている列車が到着する

など、列車間の混雑に差がある傾向が見られた。

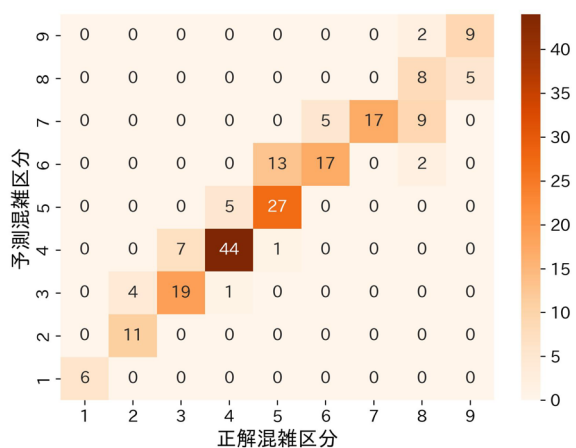
また、本研究では、旅客は、現時点から15分程度先の混雑の推移に関心があるとみなすこととした。具体的には、本ケーススタディでは、駅数にして5駅程度先までとなる。

これらをもとに、テスト対象を、テストデータ候補の、運転再開後から遅延がほぼ回復するまで、すなわち7:35から10:35にM駅から5駅先のH駅を走行する上り列車（図3の灰色破線で囲った部分）と定めた。このときのデータ件数は212件であった。このデータに対して、3.1節の前処理と3.3節の特徴量作成を行い、テストデータを作成した。

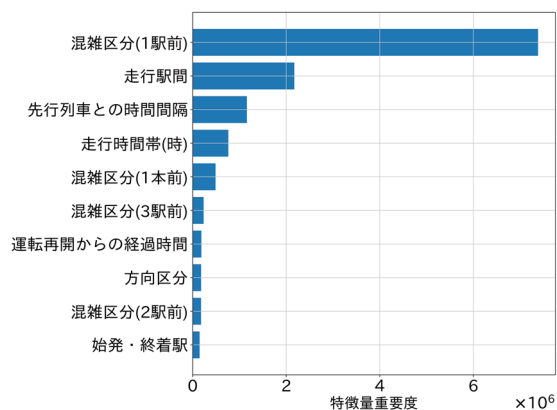
4.2 予測結果

構築した予測モデルを4.1節のテストデータに適用したところ、予測モデルの予測精度は、正解率75%、Macro F1 値75%となった。

混同行列を図4(a)に示す。縦軸は、予測モデルが予測した混雑区分（以下、予測混雑区分と呼ぶ）、横軸は、実際の混雑区分（以下、正解混雑区分と呼ぶ）である。混同行列を確認すると、正解混雑区分が1から6のときは、概ね正しく混雑区分を予測できているものの、混



(a) 混同行列



(b) 特徴量重要度

図4 予測モデルによる予測結果の例

雑区分を1段階大きく予測するケースも見られた。また、正解混雑区分が7以上のときは、ほとんどの場合で混雑区分のずれが1段階であり、正解混雑区分が8のときは、2段階小さく予測することがあった。正解混雑区分が大きな値のとき、予測モデルが混雑区分を小さく予測してしまう傾向は Gallo ら⁶⁾でも見られたが、この理由として、学習データの中にテストデータと似たような状況がほぼ存在しなかったことが挙げられる。具体的には、図3に示したように、テストデータでは特定の駅間に走行する列車の混雑区分がいずれも8か9である状態が30分程度続いた。しかし、学習データの中にテストデータと似た状況が存在せず、十分学習できなかった可能性がある。

特徴量重要度を図4(b)に示す。この特徴量重要度は、後述する gain という指標を基にしている。LightGBM で用いている決定木は、内部でデータを条件に従って枝分かれさせ、データを分類する操作を行う。例えば、「特徴量 X が 10 以上かどうか」という条件でデータを二分するといった操作が行われる。gain とは、ある特徴量を使って木を分岐させた際に、分岐前と分岐後で、目的

関数がどれだけ改善されたかを示す指標である。分岐の際に使用した特徴量ごとに gain の値を記録しておき、それらを最後に合計することで特徴量重要度が算出される。なお、詳細な特徴量重要度の計算方法は、XGBoost のチュートリアル¹¹⁾を参照されたい。

混雑区分を予測するために最も重要であった特徴量は1駅前の混雑区分であり、次に走行駅間、先行列車との時間間隔と続くことが明らかになった。特に、予測対象列車駅の1駅前における混雑区分の寄与度が大きく、2駅前の混雑区分や3駅前の混雑区分は予測精度の向上にあまり貢献しなかった。

この理由としては、本路線の事情と混雑区分の定義にあると考えられる。本路線は、朝ラッシュ帯において X～L 駅等から E～A 駅等へ移動する利用者が大半を占めている。つまり平常時には、X 駅から車内が徐々に混雑し、E 駅や D 駅で混雑が解消する傾向にある。しかしダイヤ乱れ時には、X～S 駅の各ホーム上で待機していた乗客が一度に乗車し、O～E 駅間では混雑区分が8あるいは9のまま変動していない。よって、予測モデルは、2～3 駅前から徐々に混雑区分が増加するといった傾向よりも、1 駅前の混雑情報を重要視するモデルになったと考えられる。

最後に、正解混雑区分と予測混雑区分のずれをダイヤ上にプロットした結果を図5に示す。この図は、正解混雑区分と予測混雑区分の差が大きくなればなるほど濃い赤、あるいは濃い青で着色し、予測混雑区分が正解混雑区分より大きい場合は青、その逆は赤で着色している。なお、予測が当たった場合は、灰で着色した。図5を確認すると、予測モデルは運転再開直後に走行する列車については、混雑区分を小さく予測する傾向にあり、運転再開から2時間が経過し、比較的混雑が落ち着いた列車については、混雑区分を1段階大きく予測してしまうという特性があることがわかった。この理由としては、学習データの中にテストデータと似た状況が見つからなかったことが考えられる。よって、今後は、より多種多様なダイヤ乱れ時のデータを集め、学習データを充実させることで、予測精度を向上できる可能性が示唆される。

5. まとめ

ダイヤ乱れ時における列車の混雑を予測する手法を構築し、1つの実事例に対して検証を行った。検証の結果、先行列車の混雑区分や予測対象の列車駅の1～3駅前の混雑区分を特徴量として用いたとき、75%の正解率で混雑区分を予測できることが明らかになった。

今後の課題としては、他事例での検証や、長時間先の列車の混雑区分を予測するモデルの構築が挙げられる。実際、ダイヤ乱れ時に鉄道利用者が欲する情報は、いつ

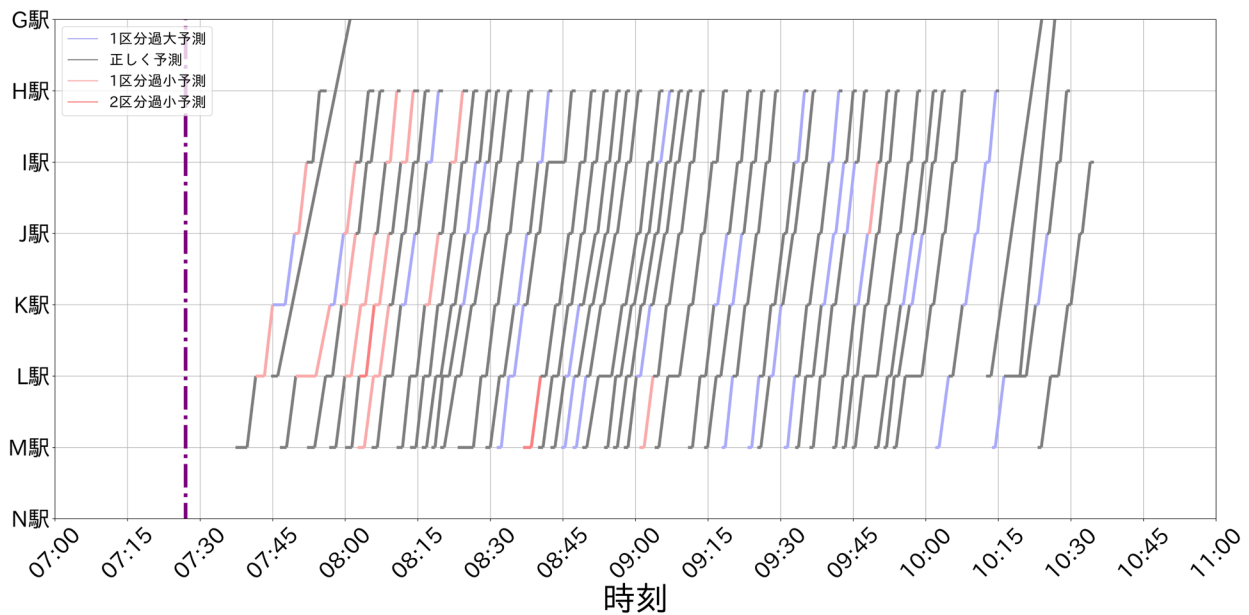


図5 正解混雑区分と予測混雑区分のずれ

混雑が収束するののかという点であると考えられる。これらの情報を提供するためには、長時間先の列車の混雑を予測しなければならないが、本研究の予測モデルは、当該列車の直近の混雑情報を必要とするため、これらの課題に対応することが困難である。そこで、今後は、直近の混雑情報を用いない予測モデルの構築に取り組みたい。

文献

- 1) El Maazouzi, Q., Retbi, A. and Bennani, S.: Automatisation hyperparameters tuning process for times series forecasting: application to passenger's flow prediction on a railway network, *The 7th International Conference on Smart City Applications*, XLVIII-4/W3-2022, 53-60, 2022.
- 2) 中挟晃介, 辰井大祐, 國松武俊: ニューラルネットワークを用いた列車遅延・乗車率予測手法, *情報処理学会論文誌*, Vol.60, No.4, pp.1129-1140, 2019
- 3) Yang, Q., Ma M.: Research on Prediction Method of the Train Occupancy rate Based on Machine Learning, In 2021 7th Annual International Conference on Network and Information Systems for Computers, pp.685-691. 2021.
- 4) Wang, B., Wu, P., Chen, Q. and Ni, S.: Prediction and analysis of train passenger load factor of high-speed railway based on LightGBM algorithm, *Journal of Advanced Transportation*, Vol.2021, pp.1-10, 2021.
- 5) Jamar, L., Büchel, B. and Corman, F.: A network-wide approach to predicting urban public transport passenger numbers at a stop-to-stop level, M.S. Thesis, Eth Zurich, Zurich, Switzerland, 2020.
- 6) Gallo, F., Sacco, N. and Corman, F.: Network-wide public transport occupancy prediction framework with multiple line interactions, *IEEE Open Journal of Intelligent Transportation report*, Vol.26, No.3, pp.32-37, 2023.
- 7) 山城昌雄, 大塚理恵子, 佐原亨, 川崎健志, 坂入整: 機械学習を用いた輸送障害時の旅客流動予測モデルの開発, *交通・物流部門大会講演論文集 2021*. 30, 日本機械学会, SS5-2-4, 2021
- 8) Ke, G., Meng, Q., Finley, T., Wang, T., Chen, W., Ma, W., Ye, Q. and Liu, T. -Y.: LightGBM: A highly efficient gradient boosting decision tree, *Advances in neural information processing systems*, Vol.30, 2017.
- 9) LightGBM's documentation: Advanced Topics, LightGBM (online), available from <<https://lightgbm.readthedocs.io/en/latest/Advanced-Topics.html>> (accessed 2025-1-16).
- 10) Grandini, M., Bagli, E. and Visani, G.: Metrics for multi-class classification: an overview, arXiv (online), available from <<https://arxiv.org/abs/2008.05756>> (accessed 2025-1-16).
- 11) XGBoost: Introduction to Boosted Trees, DMLC (online), available from <<https://xgboost.readthedocs.io/en/latest/tutorials/model.html>> (accessed 2025-1-16).

トンネル壁面画像を用いた健全度自動判定 ・ 要注意箇所投影技術の開発

仲山 貴司* 山下 雄大* 野城 一栄*

Development of an Inspection Support System Using Tunnel Wall Images

Takashi NAKAYAMA Yudai YAMASHITA Kazuhide YASHIRO

Regular inspections are required for the maintenance of railway tunnels. Inspectors determine soundness through visual inspection and hammering test to ensure proper maintenance. With a predicted decline in the labor force, there is a growing need for the digitization and automation of tunnel inspections. In this study, we developed two technologies to address this need. The first is an “Automatic Tunnel Condition Assessment System,” and the second is a “Critical Area Projection System”. This paper describes the overview and verification results of each system.

キーワード：トンネル，検査，AI，プロジェクションマッピング

1. はじめに

日本の鉄道トンネルは、図1のように戦前または高度経済成長期に建設されたものが多く、古くから定期的な検査の周期や方法などが体系化されてきた。「鉄道構造物等維持管理標準・同解説（構造物編）トンネル」（以降、「維持管理標準（トンネル）」と記す）¹⁾では、「通常全般検査」と呼ばれる、性能低下またはその恐れのあるトンネルを抽出することなどを目的とした定期検査を2年毎に行うこと、また、通常全般検査に比べ検査精度を高めて実施する「特別全般検査」を原則として新幹線で10年、新幹線以外で20年を超えない期間毎に実施することとされている。現在、経験豊富な検査員の十分なりソースのもと、この期間毎に目視および打音調査が実施され（図2）、必要な補修などが講じられている。

一方、日本の鉄道トンネルの総延長は約4,000kmにも及び²⁾、また、今後は少子化に伴い労働人口の減少も見込まれている³⁾なかで、検査業務をいかに効率化するかが課題になっている。近年はトンネルの検査へのデジタル技術の活用が重要視されており⁴⁾、既に実用化されている代表的な技術としては、トンネル壁面に発生している変状のスケッチや台帳整理作業の補助ツールとして、壁面を連続して撮影していく技術^{例えば5)}や、撮影画像からひび割れを検出するAI技術^{例えば6)}がある。

しかしながら、これらの技術を用いた場合にも、ひび割れ以外の変状を画像から抽出して台帳に整理する作業は全て人手に頼っており、また、画像確認結果を踏まえて現地で行う要注意箇所の打音調査では、暗いトンネル内において、紙台帳と照合して調査位置を特定するのに

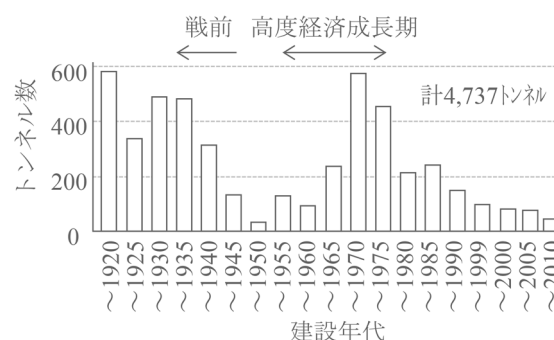


図1 鉄道トンネルの建設年代と数量



図2 鉄道トンネルの打音調査の例

時間を要している。

そこで本研究では、これらの課題を解決し、更にトンネル検査の効率化を図れる、トンネル壁面画像を用いた検査支援システムを開発した。

一つめは、撮影画像からAIを用いてひび割れ以外の変状や補修跡も検出し、トンネル全体の健全度の目安と重点的に調査すべき要注意箇所を自動で抽出する「変状

* 構造物技術研究部 トンネル研究室

抽出・健全度判定アプリ」である。二つめは、現地での調査箇所の目印として、トンネル壁面に、赤く塗りつぶしたメッシュで要注意箇所を投影することができる「要注意箇所投影装置」である。

本稿では、これらの開発技術の詳細を紹介するとともに、精度や導入効果を検証した結果を報告する。

2. 変状抽出・健全度判定アプリ

2.1 概要

図3に、開発した「変状抽出・健全度判定アプリ」（以下、「本アプリ」と記す）の概要を示す。

汎用的なパソコンで稼働するアプリケーションであり、撮影画像からAIを用いて錆汁や漏水などを自動検出する「変状抽出AI」を有し、また、維持管理標準（トンネル）の健全度の判定例に基づき作成した「判定マトリックス」と検出した変状を照合して、最も重い健全度を一定区間毎に健全度の目安として表示する。

一般にAI検出技術は、顔認証のように対象が識別しやすい場合において高い精度を有する。トンネルの変状は重なり合っている場合が多く識別が難しいこと、健全度の判定には現場の特情なども加味する必要があることなどから、ある程度の精度しか得られないことが想定された。しかしながら、現状は、ひび割れ以外の変状の検

台帳整理(事務所)

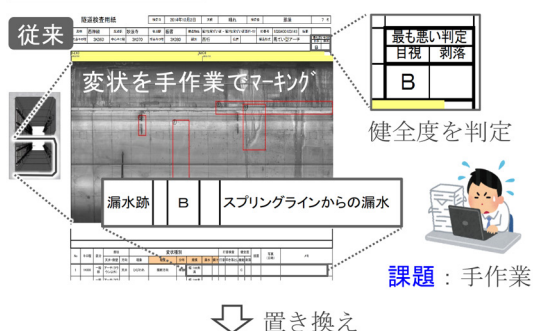


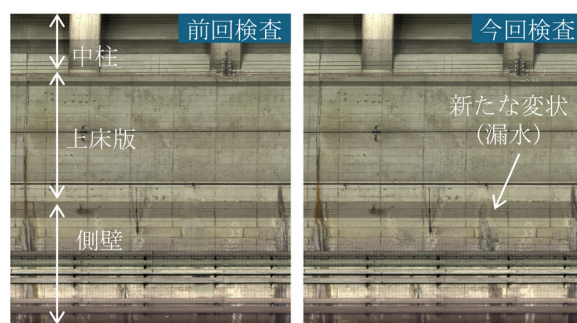
図3 変状抽出・健全度判定アプリの概要

出作業は全て人手に頼っており、特に台帳にまとめる作業には多くの労力を割いている。そのため、ある程度の精度が得られれば、補助ツールとしては有用であると考え、本アプリを開発した。

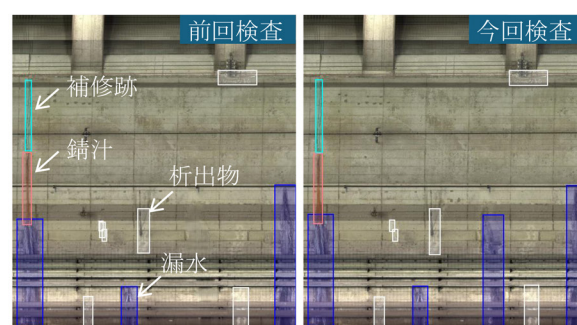
2.2 変状抽出 AI

検出対象とした変状は、健全度判定に際し、重要な情報となる鉄筋露出、錆汁、漏水とするほか、背面にひび割れが隠れている可能性の高い析出物（エフロレッセンスや遊離石灰）についても対象とした。さらに、補修跡についても一般に台帳整理されることから、代表的かつ数量の多い断面修復、導水樋設置箇所を対象とした。

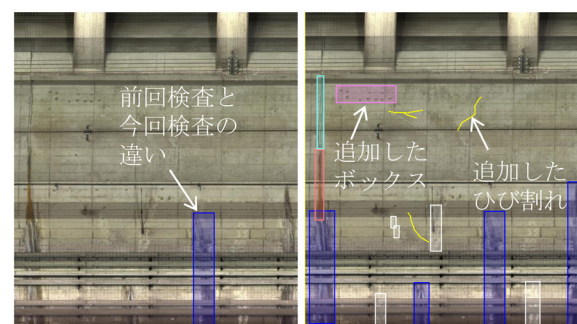
図4には、構築したAIによる変状抽出結果の一例を示す。これらの図は、時期の異なる2回の検査（「前回検査」と「今回検査」記す）で画像撮影を行い、新たに漏水が発生した場合を再現したものである。図4（a）



(a) 元画像



(b) 検出結果



(c) 差分表示

(d) 変状の追加

図4 変状抽出結果の例

のうち、「今回検査」では、画像処理を行って、「前回検査」と比べて漏水箇所が増えた状態を疑似的に再現した。図4 (b) が検出結果であり、それぞれにおいて漏水や析出物などが色枠（ボックス）で検出されていることがわかる。また、図4 (c) は前回検査と今回検査の差分を示したものであり、新たに発生したと漏水がピックアップされていることがわかる。

なお、検査員が、変状の追加や検出結果の修正を行える機能も有している。一例として、図4 (d) には、手入力でボックスを追加し、ひび割れをCAD から読み込んだ結果を示す。

変状抽出 AI の構築には、開発時点で、Microsoft が提供する COCOAPI（Common Objects in Context API）に対して高い性能を有すると評価されていた、畳み込みニューラルネットワーク（CNN）である YOLO（You Only Look Once）v5 を用いた。YOLOv5 モデルには、ネットワークのサイズに応じて小さいものから s, m, l, x の4種類がある。サイズ（畳み込み層の層数）が大きくなると、必要なメモリ量が増え、学習に要する時間が増えるが、検出精度は高くなるとされていた。

一方、教師データには、鉄道総研においてこれまでに蓄積してきた変状撮影画像を用い、アノテーションに際しては、変状を適切に見分ける専門知識が必要になるため、すべて鉄道トンネルの専門技術者が行った。教師データは多いほど精度があがることから、判定システムの構築後も逐次追加を行っているが、本報告ではシステム構築当初の教師データ（鉄筋露出：512 枚、錆汁：2704 枚、漏水：15684 枚、析出物：5452 枚、断面修復：2774 枚、漏水樋：1200 枚、いずれも上下、左右反転の処理を行い拡張した後の数量）に対する検証結果を示す。

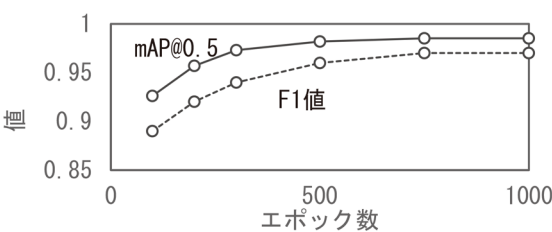
図5 にモデルおよびエポック数（全てのデータを学習させた回数）を変えて学習させた結果を示す。

図5 (a) は、s モデルを用いた場合について、AI の評価指標である mAP@0.5, F1 値とエポック数の関係を示したものである。エポック数が500程度まで評価指標の大きな向上がみられる。また、図5 (b) はモデルと評価指標の関係であり、m と l の間で評価指標の向上がみられる。検出結果の目視確認も行ったところ、今回の教師データに対しては x（エポック数500）が最良と考えられた。

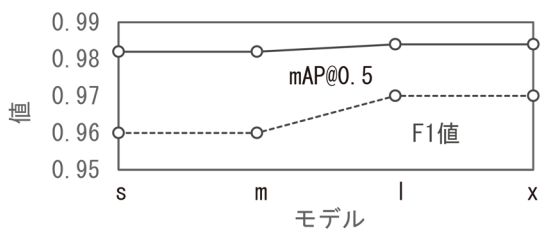
表1 には、このようにして作成した AI を用いて、学習に使用していない画像に対して変状・補修跡を正しく検出できた割合を示す。鉄筋露出箇所は90%、錆汁、漏水、析出物、補修跡および導水樋は95%以上のスコアを得ることができた。

2.3 健全度の判定マトリックス

維持管理標準（トンネル）では、表2 に示す健全度の



(a) エポック数と mAP@0.5, F1 値の関係



(b) モデルと mAP@0.5, F1 値の関係

図5 学習結果

表1 構築したモデルの混同行列

		正答					
		a	b	c	d	e	f
推定結果	a	0.90					
	b		0.96				
	c			0.98			
	d				0.96		
	e					0.98	
	f						0.97
	—	0.10	0.04	0.02	0.04	0.02	0.03

a：鉄筋露出，b：錆汁，c：漏水，d：析出物
e：補修跡，f：導水樋，—：未検出

表2 構造物の状態と標準的な健全度の判定区分¹⁾

健全度		構造物の状態
A		運転保安，旅客および公衆などの安全ならびに列車の正常運行の確保を脅かす，またはその恐れのある変状等があるもの
	AA	運転保安，旅客および公衆などの安全ならびに列車の正常運行の確保を脅かす変状等があり，緊急に措置を必要とするもの
	A1	進行している変状等があり，構造物の性能が低下しつつあるもの，または，大雨，出水，地震等により，構造物の性能を失う恐れのあるもの
	A2	変状等があり，将来それが構造物の性能を低下させる恐れのあるもの
B		将来，健全度 A になる恐れのある変状等があるもの
C		軽微な変状等があるもの
S		健全なもの

判定区分が示されている。通常全般検査では、一般に健全度を A, B, C, S のランクに区分する。ただし、運転保安、旅客および公衆などの安全ならびに列車の正常運行の確保を脅かす変状を発見した場合には健全度 AA とし、緊急に措置を講じる。なお、健全度 A と判定された構造物に対しては、「個別検査」と呼ばれる詳細調査を行い、さらに細分化した判定（AA, A1, A2）を

行う。

本研究では、維持管理標準（トンネル）に示される性能項目のうち、トンネル構造の安定性を対象として、通常全般検査を想定したA、B、C、Sの4段階の判定を行うこととした。

表3に判定マトリックスを示す。維持管理標準（トンネル）に記載されている判定例を反映しつつ、安全側の判定が得られるよう作成した。前述したように、本アプリ内では、この判定マトリックスに個々の変状を当てはめてそれぞれの健全度を求め、最も重い判定を指定区間の健全度としている。

錆汁および漏水は、大きさや発生位置に応じた2段階の判定を設定した。スプリングラインより上方にある場合、抽出ボックスが画像に占める線路方向の密度が大きい場合（20%以上）は重い健全度とすることとした。また、補修跡については、維持管理標準（トンネル）において明確な判定例はないが、判定システムでは健全度Cすることを標準設定とした。

判定精度については、鉄道事業者の検査台帳と比較することで検証した。なお、検出対象とした変状に対しての健全度のみを比較した。図6に、10駅間で行った事業者の判定結果との照合による健全度判定の検証結果を示す。1kmで移動平均して、健全度のトレンドを比較したものである。検査台帳の健全度は要注意箇所の実地確認後の最終判定ではあるものの、本アプリは事前にその傾向を捉えていることがわかる。一方、図6の※印のように、特情があり一致していない箇所もある。これらは、補修前に発生していた変状規模が大きかったこと加味して、補修後においても健全度はSまで回復した

とせずに、健全度をBまたはCとしておくなど、現場の特況が加味された箇所でありされている判定がなされていることが原因で生じたもので、検査員が出力結果の確認の際に修正することを想定している部分であった。

なお、この検証を行うにあたり、トンネル1kmあたりを1人で作業し、全て手作業による場合と、本アプリによる自動検出結果を手作業で修正する場合の時間を測定した。この結果、全て手作業による場合は35分要するのに対して、アプリを併用する場合には1分程度と時間短縮できることが明らかになった。

以上の結果から、撮影画像の画質や映り込む変状数量によって異なることが想定されるものの、本アプリは検査作業を効率化できるツールとして期待できるものであると考えられた。

3. 要注意箇所投影装置

3.1 概要

図7に、開発した「要注意箇所投影装置」（以下、「投影装置」と記す）を示す。投影装置は、図7(a)に示すように、要注意箇所を投影するためのプロジェクター、プロジェクターを軽便トロ上に固定する台座、制御PCおよび移動距離測定装置からなり、図7(b)に示すように、変状抽出・健全度判定アプリから転送した、要注意箇所を赤色で塗りつぶした正方形でなるメッシュ図を、走行しながら定位置に投影することができるものである。

任意のトンネル形状に正しく正方形を投影するためには、その形状に合わせてメッシュ図を幾何学的に補正する必要がある。本装置では、財産図から形状を入力のうえ、投影装置と壁面の距離を測定することで、プロジェクターに投影画面を受け渡すメッシュ図を、プロジェクターの仰角、走行距離に合わせて自動補正するアルゴリズムを構築した（図8）。

具体的には、プロジェクターは図8内の仮想投影面に正しく投影されるよう画面を出力するため、壁面に長さLで等間隔に点A～Cを投影する場合、仮想投影面の点

表3 判定マトリックスの標準設定

	正答				
	鉄筋露出	錆汁	漏水	漏水跡補修跡	なし
健全度	A	A～B※	A～B※	C	S

※大きさや発生位置に応じて判定

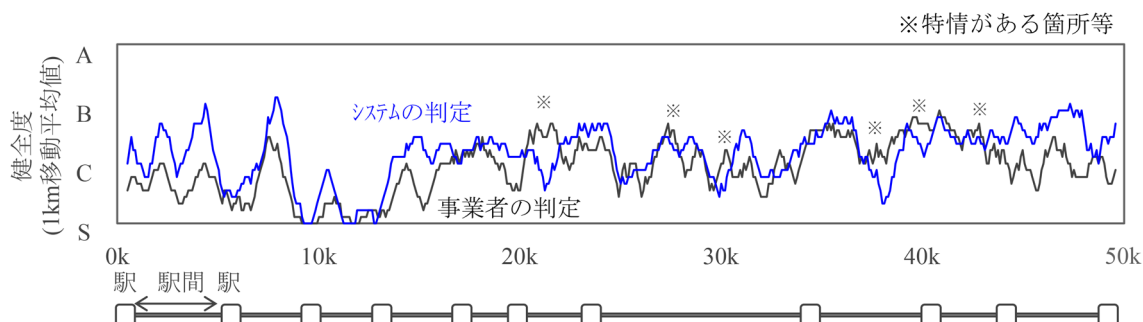
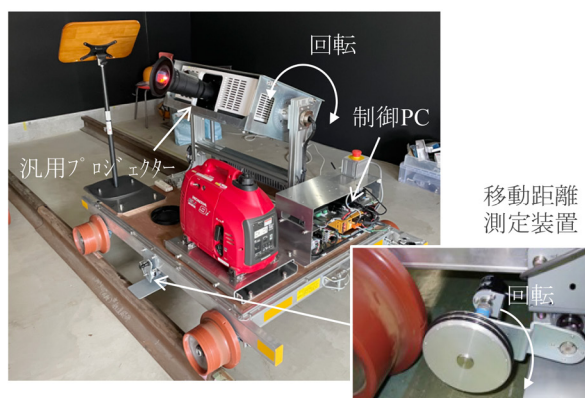


図6 健全度判定の検証結果



(a) 投影装置の外観



(b) 投影例（モックアップへの投影）

図 7 要注意箇所投影装置の概要

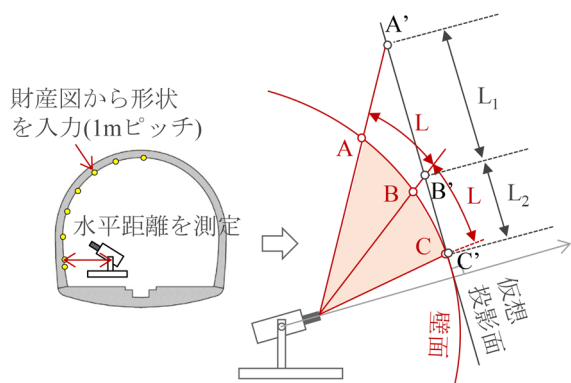


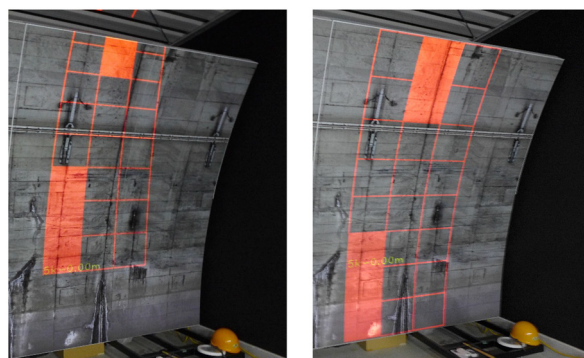
図 8 メッシュ図の補正

A'～C'に間隔 L_1 , L_2 で投影するよう形状補正している。図 9 は形状補正の有無による投影状況を示しており、形状補正を加えることで正方形に投影されていることが確認できる。

3.2 モックアップを用いた検証

投影装置の開発にあたっては、まず、図 7 (b) に示したように、照度を調整できる暗室内に約 1/3 スケールの FRP 製のモックアップを制作し、機材の選定やメッシュ図の形状補正プログラムの検証を行った。

メッシュ図の形状補正プログラムの検証については、後述する現場検証と重複するため、本報告では、要注意



(a) 補正：無

(b) 補正：有

図 9 形状補正の有無による投影結果の違い

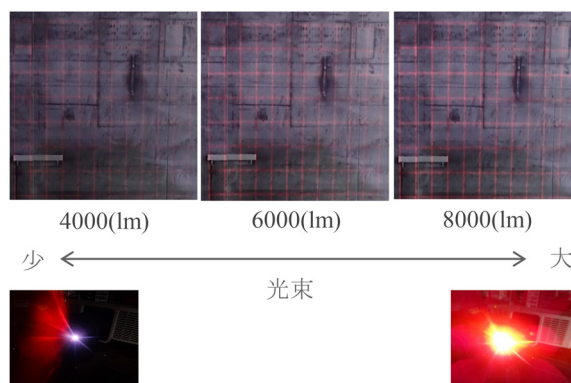


図 10 必要光束の検証結果

箇所を鮮明に投影するためにプロジェクターに求められる光束を検証した結果を示す。

室内照度を現地のトンネル坑内の明さに近い 30 lx 程度とし、プロジェクターの光束を調整のうえ、目視によりメッシュ図が鮮明になる光束値を確認した。この際の投影状況の写真と光束値の関係を図 10 に示す。目視で確認したところ、光束が少ないとメッシュ図は不明瞭であるが、光束が大きくなるにつれてメッシュ図が明瞭になっていることが確認できた。この検証結果から、プロジェクターの光束は 8000lm 以上あればよいものと考えられた。

3.3 現場検証

鉄道事業者が撮影済のトンネル壁面画像を用いて、事前に机上で AI による変状および要注意箇所の自動抽出を行ったのち、実際に投影システムを現地に持ち込み、正しく投影できるか検証した。

図 11 に、高所作業台車上の要注意箇所を投影した状況を示す。少し離れた位置に装置を配置することで、台車にプロジェクターの光が遮られることなく、壁面にメッシュ図が投影できていることがわかる。一方、図 12 には、移動距離測定装置の精度を検証した結果を示



図 11 高所作業車台上での打音調査の試行

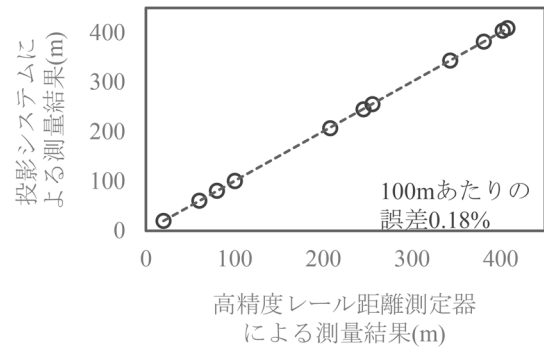
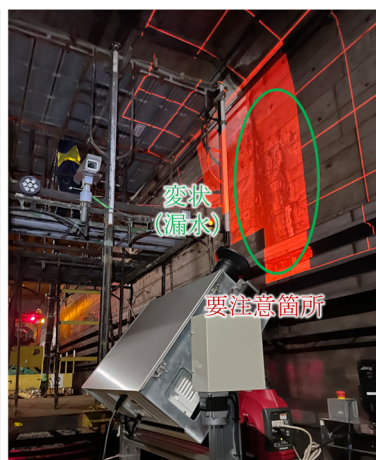


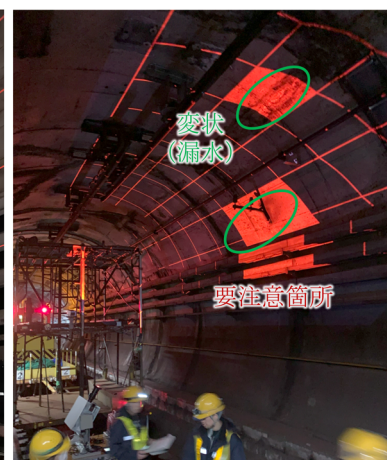
図 12 高所作業車台上から見た場合のメッシュ



(a) 馬蹄形(山岳トンネル)



(b) 矩形(開削トンネル)



(c) 円形(シールドトンネル)

図 13 実トンネルへの投影状況

す。100m あたりの誤差は0.18%と小さいことがわかる。一般に、一晩のトンネル内作業は3～5時間程度に限られ、検査できる範囲は数百 m 程度である。例えば、20cm の誤差が生じる度に調整するとしても数回程度であり、また、調整は移動距離測定装置を手で回転させることで容易に行えることから、実用に問題ない測定精度であると考えられた。

また、代表的なトンネル形状である馬蹄形、矩形および円形のトンネル断面形状で正しく投影できるかを確認しており、図 13 にその投影状況を示す。これらの写真から、いずれの断面においてもメッシュの正方形が正しく投影できていることがわかる。

さらに、図 14 には、10m 区間において投影システムを使用した場合と使用しない場合の打音調査に要する時間を 2 回測定した結果を示す。この検証から、投影装置を使用することで打音調査時間を半減できることが明らかになった。

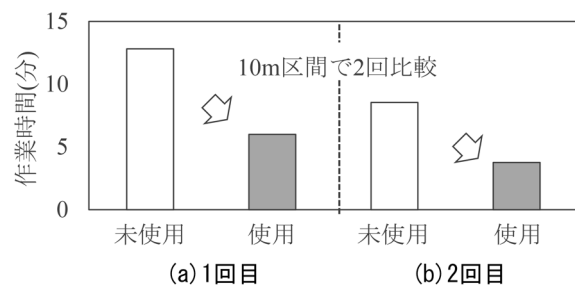


図 14 投影装置の導入効果の検証結果

4. まとめ

本研究で得られた成果を以下に示す。

- (1) 変状抽出・健全度判定アプリは、鉄道事業者の検査台帳との比較から、画像上の変状を高いスコアで検出できること、要注意箇所の現地確認前に、地下路線全体の健全度のトレンドを捉えられることを確認した。
- (2) 要注意箇所投影装置は、現地検証において正しく投影でき、移動距離測定も実用にあたり十分な精度を有することを確認した。

(3) 開発技術を使用して検査作業を試行した結果、検査作業の効率化が図れる結果が得られた。

※本研究は国土交通省交通運輸技術開発推進制度（JP002223）により実施した。

文 献

- 1) 国土交通省鉄道局監修，鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等維持管理標準・同解説（構造物編）トンネル，丸善出版，2007
- 2) 国土交通省鉄道局：鉄道統計年報（令和3年度版），2022
- 3) 厚生労働省：人口減少下の中で誰もが活躍できる社会に向けて，労働経済の分析，2016
- 4) 国土交通省：技術活用による持続可能な社会に向けた取り組み，国土交通省，2023
- 5) 全邦釘，井後敦史：Random Forest によるコンクリート表面ひび割れの検出，土木学会論文集 F3（土木情報学），Vol.71, No.2, pp.I_1-I_8, 2015
- 6) 海瀬忍，伊藤哲男，前田佳克，八木弘，前田洸樹，進士正人：トンネル覆工表面画像撮影技術による近接目視点検の代替の可能性，土木学会論文集 F1（トンネル工学），Vol.76, No.1, pp.62-78, 2020

鉄道総研報告 監修スタッフ

■監修責任者

芦谷公稔

■編集責任者

小島謙一

■企画・監修

川崎邦弘	上半文昭	石毛 真	武内陽子
仁平達也	瀧上唯夫	田所敏弥	根津一嘉
桃谷尚嗣	布川 修	福田光芳	平井 力
松井元英	池田 学	斉藤実俊	水上直樹
富田 優	豊岡亮洋		

鉄道総研報告 第39巻 第7号

2025年7月1日 発行

監修・発行所：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2-8-38

©2025 Railway Technical Research Institute

本誌に関するお問い合わせ先
総務部広報 電話 042-573-7219

RTRI REPORT

Vol. 39 No. 7

Jul. 2025

PAPERS

- Diagnosis of Engine Condition with an Oil Condition Monitoring System
..... J.SUZUMURA, S.KIKAWA, K.IKOMA, T.TAKASHIGE (1)
- Influence of Nonlinearization of Ground and Structure on Combination of Inertia Force and Ground
Deformation Used in Seismic Deformation Method
..... N.TANAKA, K.SAKAI (9)
- Effect of Interaction between Bedrock and Surface Layer on the Predominant Period of Surface
Layer
..... K.SAKAI (19)
- An Implementation and Verification on a Model for Predicting Level of Train Congestion during
Disruptions
..... H.UEDA, K.NAKABASAMI, T.KUNIMATSU (27)

RESEARCH REPORT

- Development of an Inspection Support System Using Tunnel Wall Images
..... T.NAKAYAMA, Y.YAMASHITA, K.YASHIRO (33)

