

鉄道総研報告

第40巻 第5号

2026年5月

論文

施設 線路下小口径管の破損および浸透水に起因した鉄道盛土の沈下の簡易評価法
..... 松丸貴樹, 佐藤武斗, 嶋本敬介, 森裕昭 (1)

施設 携帯情報端末で取得した列車前方動画による線路周辺空間の復元
..... 梶原和博, 田中博文 (10)

施設 列車前方画像を用いた駅ホーム高さ・離れ計測手法の開発
..... 松岡弘大, 中田悠貴, 加藤聖 (20)

施設 支承の免震化による連続PC桁の地震時走行安全性と復旧性の評価
..... 成田顕次, 徳永宗正, 池田学 (29)

技術報告

運転 鉄道運転士の聴力検査に用いるささやき声の音圧・周波数特性
..... 星野慧, 倉友乃康, 上田珠生, 鈴木浩明, 山本尚寿 (38)



鉄道総研報告
RTRI REPORT線路下小口径管の破損および浸透水に起因した
鉄道盛土の沈下の簡易評価法松丸 貴樹* 佐藤 武斗*
嶋本 敬介** 森 裕昭***Conventional Evaluation Method for Railway Embankment Settlement due to Damage and Water
Infiltration to Small-diameter Pipe Under TrackTakaki MATSUMARU Taketo SATO
Keisuke SHIMAMOTO Hiroaki MORI

Small-diameter pipes installed in railway embankments are often affected by seepage water when they are damaged, which causes soil outflow and leads to track settlement and cave-ins. In this study, we investigated pillars buried in railway embankments and conducted model experiments to understand the decrease in ground reaction force around the pipes. We also developed a numerical analysis method that takes into account the decrease in ground reaction force and calculated the degree of impact of pipe damage caused by seepage water on track settlement. The results are illustrated in a chart that classified the magnitude of the impact.

キーワード：伏び，盛土，沈下，浸透水，影響度判定チャート

1. はじめに

鉄道盛土には、土構造物の排水や、周辺環境の生活や産業での活用のための導水を目的とした小口径横断管（以下、「伏び」と記す）が埋設されている。これらは鉄道盛土の建設時に埋設されたものがほとんどであり、長い経年を有するものも多い。これまで、伏びを有する鉄道盛土では軌道変状や陥没が発生することで、列車の運行に大きな影響を及ぼす事例が多々報告されている。一方、鉄道事業者は土構造物の維持管理として定期的に伏びの検査・修繕を実施しているが、数量が多いことや盛土のり面での草木の繁茂が伏びの位置の特定を難航させることから、全数の伏びの検査を一巡させるために膨大な時間を要している。伏びに関する種々の条件（管径や土被り、盛土条件など）に応じて軌道への影響度合いは異なると考えられ、検査にかかるリソースを適切に配分できるよう、軌道への影響度を定量的に評価できる手法が求められていた。

大原ら¹⁾は、伏びの破損を想定し、その直上の盛土で地盤反力が低下するものと仮定し、数値解析モデルを用いて軌道への影響度を算定し、伏びの緒元に応じた影響度をチャートして取り纏めている。この研究では、管径が大きいほど、土被りが小さいほど伏びが軌道変位に及ぼす影響が大きく算定されており、これまでの軌道変状や陥没の発生とは概ね整合しているものと考えられる。しかしながら、このチャート作成時は伏びに破損があることのみを想定している。伏びに破損があることでその後の伏びの供用過程において、浸透水の影響を受けることによって盛土内へより水が浸透することや、逆に盛土材料を伏び内に引き込み盛土から流出させる可能性も考えられる。また、このような事象は伏びに目立った破損がなくても、例えば軽微なクラックや、伏び設置段階から設けられている継手を介しても生じる可能性がある。鉄道以

* 構造物技術研究部 土構造研究室
** 構造物技術研究部 トンネル研究室
*** 元 構造物技術研究部 基礎・土構造研究室

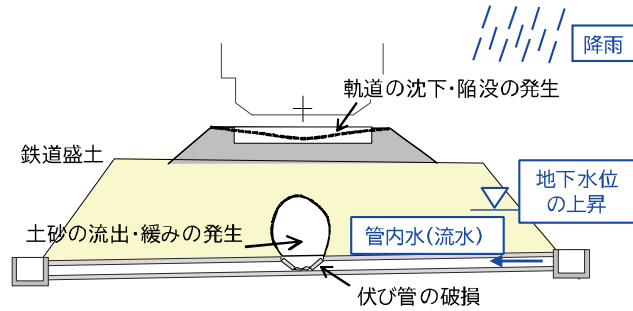


図1 損傷した伏びに及ぼす浸透水の影響

外の分野では、これまで下水道の分野において埋設管を対象とした土砂の吸出しや流出のメカニズム解明を意図した研究は多く実施されている²⁾³⁾。これらは地下水位面以下に位置する管渠を対象としているが、鉄道盛土の伏びの小口径管は集水地形等を除くと地下水位面以浅の不飽和盛土内での吸出し・土砂流出現象に着目する必要があることや、管径も小規模なものが多い特徴がある。

図1には、損傷を有する伏びに対する浸透水が及ぼす影響のイメージを示す。伏びが破損すると、その直上の盛土の一定領域で土砂の流出が生じると考えられる。その上で、降雨の浸透や盛土内での地下水水位の上昇、あるいは伏びを流れる管内水の影響によってこの領域が拡大し、場合によっては軌道の沈下や陥没の発生につながると考えられる。本研究では、このような伏びに対して浸透水が与える影響を把握するとともに、これに起因する軌道の沈下予測に活用する地盤反力係数の低下のモデル化を行い、軌道への影響度を伏びの諸元に基づいて判断できるチャートの作成を行った。

2. 実際の鉄道盛土での伏びの試掘調査

2.1 対象盛土の概要と調査内容

実際に伏びが埋設されている鉄道盛土を対象として、試掘および各種調査・試験を実施した。対象とした盛土では廃線となり軌道が撤去されており、盛土内部に伏び（陶管）が2本埋設されている。試験実施箇所の写真を図2に、断面図を図3に示す。伏びA、Bはいずれも陶管であり、伏びAは過去の全般検査で特に変状が確認されていない一方で、伏びBは過去の全般検査で変状（ひび割れ）が確認されている。調査時の天候は雨天ではなく、管内水の水位は概ね図3中に示す位置にあることを確認している。また、いずれの伏びも支持地盤より上部の盛土内に位置している。

試掘を進めながら、掘削深度および線路方向の離れを変えて小型FWD試験による K_{30} 値の計測と、試料採取を行って粒度試験に活用した。

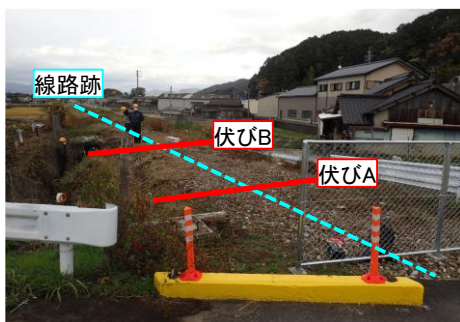


図2 現地試験実施箇所

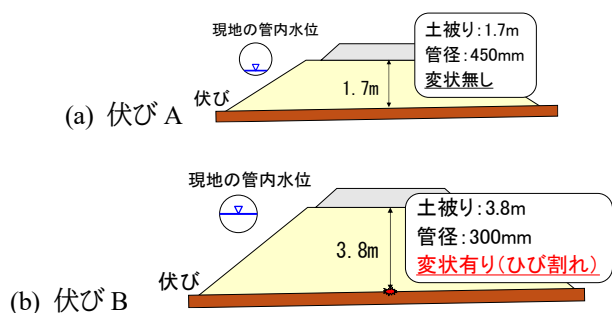


図3 試掘対象の伏びの断面図



図4 伏びの掘削状況

2.2 試掘・調査結果および考察

2.2.1 試掘調査による伏びおよび周辺盛土の状況

伏び A・B 周辺の掘削状況を図 4 に示す。まず伏び A では、左側に継手部の拡大写真を示すが、陶管の継手部周辺において数 cm 程度の小規模な空洞が存在することを確認した。また、右側に陶管継手部を覗くような方向の写真を示すが、継手部においては拳が入る程度の隙間があることも確認された。継手部周辺の小規模な空洞は、継手部の隙間から盛土材料が管内へと流出することで形成・拡大した可能性が考えられる。また、伏び周辺の一定の領域には、周囲の盛土材料とは性質の異なる粘性土が存在し、この粘性土により伏びが被覆されている状況であることを確認した。この粘性土は伏び B 掘削時にも同様にその存在を確認している。2 本の限られた伏びに対する調査結果であるため他箇所の伏びがどのようになっているかは不明であるが、伏びの敷設の際に管内の水の流出を防ぐ目的で粘性土による被覆がなされた可能性が考えられる。

伏び B 周辺では継手部には破損が見られ、管中央位置にひび割れが入っていることを確認した。過去の全般検査の結果と整合しており、掘削深度が伏び側面まで到達した時点で管内水がひび割れ部から流出することを確認した。この調査結果は、伏び B の管内水位が上昇した際に管内水が管外へと流出する可能性や、地下水位上昇時に盛土内の土砂が管内に流出する可能性があることを示唆している。ただし、目視で確認を行った範囲では伏び B 周辺に空洞は確認されなかった。

2.2.2 小型 FWD 試験および粒度試験の結果

伏び A, B 直上の盛土にて実施した小型 FWD 試験から得られた K_{30} 値の分布を図 5 に示す。本図は線路方向の断面図として示しており、横方向は伏び中心位置からの線路方向の離れを示している。図中の伏び A・B の黒および赤で示した測点では盛土材料の採取を行い、後述の粒度試験を実施した箇所に相当する。伏び A では、深度方向および線路方向の離れによる K_{30} 値の大きな変化はなく、いずれの箇所でも 120MN/m^3

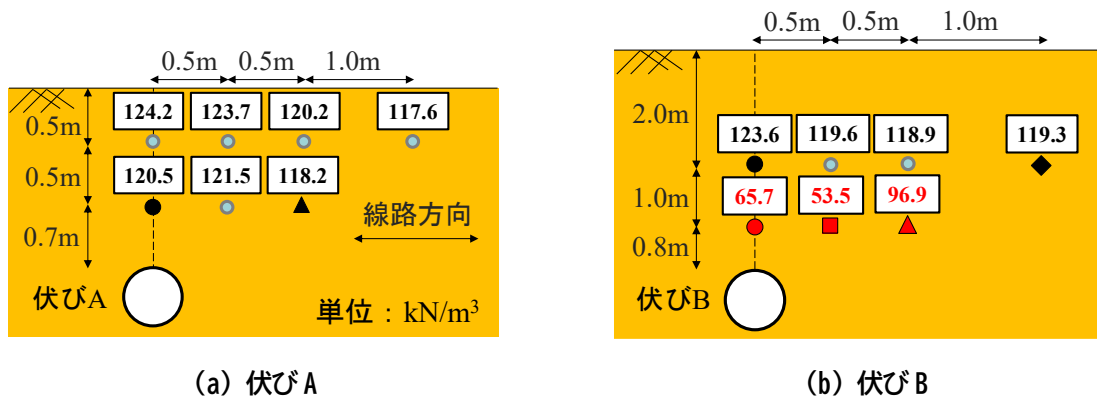


図5 小型 FWD 試験による K_{30} 値の分布

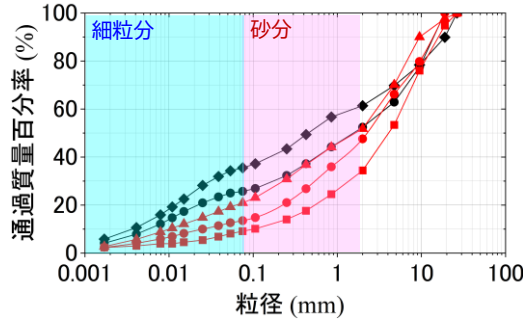


図6 伏びB周辺で採取した盛土材料の粒度試験結果

程度の値となっていた。伏びAでは(1)で示したように継手部等で小規模な空洞が確認されたものの K_{30} 値の変化がなかったことを踏まえると、小規模の空洞程度であれば地盤反力に及ぼす影響は小さいものと推察される。一方で伏びBでは図5(b)に示すように、深度3mにおいて深度2mと比較すると K_{30} 値が低下していることが確認された。その低下は線路方向に伏びに近い位置ほど顕著であり、深度2mの位置での K_{30} 値と比較すると5割程度の値となっている。

次に、伏びBで採取した各箇所の盛土材料の粒度分布を図6に示す。図中の赤いプロットは深度3m、黒いプロットは深度2mで採取した試料の分布を示しており、その記号が図5(b)の位置に対応する。伏びB直上の深度2mおよび3mで採取した盛土材料のうち、伏びBに近い深度3mの粒度分布(●や■)は深度2mの粒度分布(◆)と比較して、砂分(図中赤色の範囲)および細粒分(図中青色の範囲)の割合が減少していることが確認され、その減少は伏びBにより近い位置で大きくなっていることがわかる。また、深度2mでも伏びBに近い位置(●)においては、深度3mほど顕著なものではないが砂分および細粒分が減少している。これらの試験結果から、伏びBでは伏びに近い位置ほど砂分および細粒分が吸出しにより減少していることを示しており、これに伴う盛土の密度低下が生じることで小型FWD試験での K_{30} 値の低下に繋がったものと考えられる。

3. 模型実験による地盤反力係数低下の把握

3.1 模型実験の概要

実験模型の概要図を図7に示す。実験土槽は幅、奥行き、高さそれぞれ600mmであり、高さ100mmの位置に開口部付きの伏び模型を土槽側に固定可能な構造となっている。また、土槽背面底部にはコックを設けており、土槽内への注水や土槽内の水位確認のためのマンメータの設置が可能である。地盤の構築には東北珪砂6号を用い、支持層として鹿島珪砂2号を用いた。どちらも締固め密度比 $D_r=90\%$ (乾燥密度 $\rho_d=1.461\text{g/cm}^3$) で構築した。含水比は、鹿島珪砂については気乾状態、東北珪砂については1%とした。東北珪砂の層厚300mmの範囲については、図中に緑色の線で示すように50mmごとに色砂を敷き均し、土槽正面の亚克力面からの地盤の変状を可視化した。実験時の計測として、地盤内に土壌水分計を、地表面にレーザー変位計を、土槽背面底部にマンメータを設置し、それぞれ飽和度、地表面の鉛直変位、盛土内水位の計測を行った。

実験は2ケース実施しており、Case1は管内水の影響を確認するための流水実験、Case2は盛土内水位の影響を確認するための注水実験とした。これは、別途実施した模型実験により伏び直上地盤での沈下量の把握を試みたところ⁴⁾、図1に示す浸透水の要因のうち降雨については非常に大きな降雨強度であっても地下水位が形成されずほとんど沈下は生じることがなかった一方で、地下水位や管内水の影響によって沈

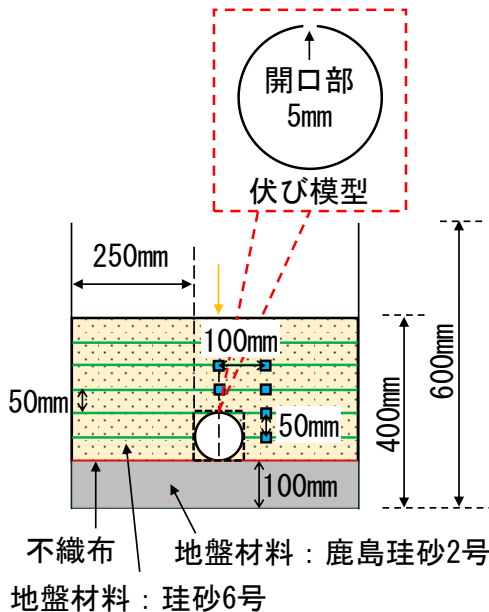
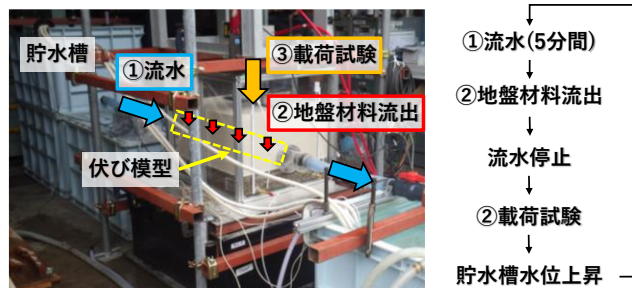
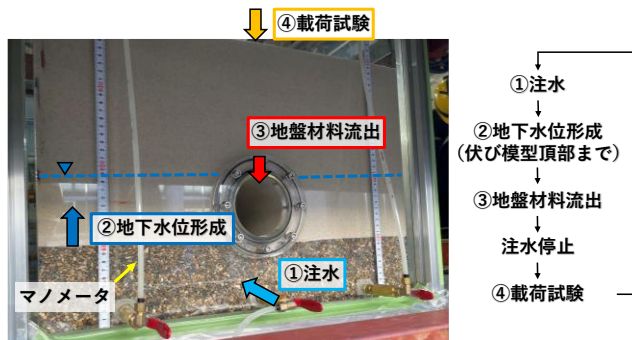


図7 実験模型の概要図



(a) Case1



(b) Case2

図8 各ケースの実験の実施状況

下が見られたためである。管内水については、実際に流水として伏びに影響を及ぼすためここでは流水実験として試験を行うこととした。

両ケースの試験の実施状況を図8に示す。Case1では別途貯水槽を設け、伏び模型と貯水槽をホースで接続することにより、管内が満水の状態で水が流れる状況(流水)を模擬した。実験中は貯水槽の水位を一定に保持しながら5分間の流水を継続し、流水を停止させた後に地表面での载荷試験を実施した。この流水・载荷試験を1サイクルとして、貯水槽の水位を徐々に上昇させながら、流水・载荷試験のサイクルを6回繰り返した。なお、载荷荷重は列車荷重を1/4スケールで模擬し、文献1を参考に所定の路盤圧力(15.7kPa)となる106Nを目標とした。一方、Case2では土槽背面底部のコックと貯水槽をホースで接続し、貯水槽の水位を上昇させることで土槽内への注水を行った。盛土内水位を開口部付近まで上昇させ、地盤材料の流入や空洞の形成を確認しながら、注水を停止し载荷試験を実施することとし、この注水・载荷試験のサイクルを9回繰り返した。なお、载荷荷重はCase1と同様とした。

3.2 実験結果および考察

3.2.1 各ケースの挙動

両ケースの载荷試験によって得られた荷重-変位関係を図9に示す。Case1では流水開始前に実施した载荷①が最も载荷時のピーク変位が小さく、载荷回数を重ねるごとに変位が増加していることが確認できる。実験時には流水によって地盤材料が管内へと流入していることが目視によって確認されており、その影響によって伏び模型上部にゆるみ領域が形成され、地表面の位置においても変位が増加したものと考えられる。ただし、流水による地盤材料の管内への流入は、伏び模型周辺に空洞が視認できるほど顕著ではなく、载荷⑤~⑦では载荷に応じて変位の増加がむしろ小さくなっており、これらの载荷では流水による土砂流出よりも繰り返し载荷を行ったことによる地盤の密実化の影響の方が大きいものと考えられる。

一方 Case2 では、Case1 と同様に注水実験前に実施した荷重①の変位が最も小さく、荷重回数を重ねるごとに変位が増加していることが確認できる。ここで、(a)と比較して初期荷重の変位が小さいのは、模型構築時の不陸の影響等によって Case1 で見られた初期荷重時の大きな変位増分を取り除くことを目的に、プレロードを実施しているためである。荷重を経るごとに変位が増加している要因としては、地盤内水位が伏び模型開口部まで到達し、水が開口部から管内へと流入する際に、浸透破壊が生じることで地盤材料を巻き込んだためである。変位の増加が顕著な荷重⑩については、極端な管直上の空洞の発生は見られなかったものの目視で盛土内水位の影響による地盤材料の流入が急激に増加したことが確認されたサイクルであり、地盤内空洞が拡大した際の影響の大きさを表している。本ケースにおける変位の増加については、この空洞が形成・拡大し、その上部にゆるみ領域が形成された影響が大きいものと考えられる。

3.2.2 地盤反力係数の低下

荷重初期に対する地盤反力係数の低下度合いを試験の進行に対する時刻歴として図 10 に示す。地盤反力係数の算出は、100N 荷重時における荷重圧力を得られた変位で除して算出した。地盤反力係数の低下は、流水の影響よりも盛土内水位の影響の方が顕著であることを確認し、荷重⑨から⑩の段階で地盤反力係数が初期の 1/10 程度となっている。一方で、流水の影響についても地盤反力の低下度は最大で 5 割程度となっており、2 章で示した現地計測の結果と概ね整合している。このことから、伏びに破損が発生した際には、浸透水の影響を受けることで地盤反力係数が小さくなっていくものと考えられ、この影響が拡大していくことで軌道の変状や線路陥没へと繋がるものと推察される。

今回の実験では、単粒度の珪砂を用いて模型地盤を構築しており、伏び模型からの地盤材料の流入が極めて発生しやすい条件下での実験であると考えられる。実際の鉄道盛土での地盤反力係数の低下は、盛土材料の特性の影響を大きく受けるが、条件によっては地盤反力係数が大きく低下し得ることを試験結果は示唆している。

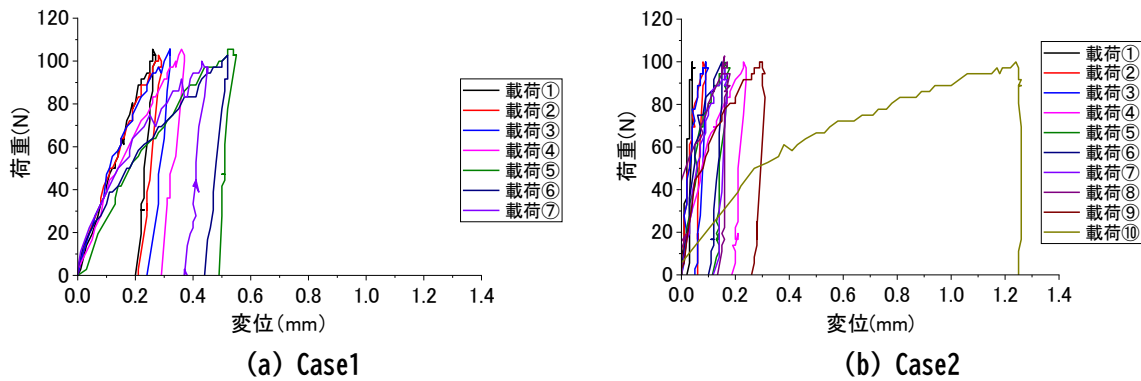


図 9 荷重試験で得られた荷重～変位関係

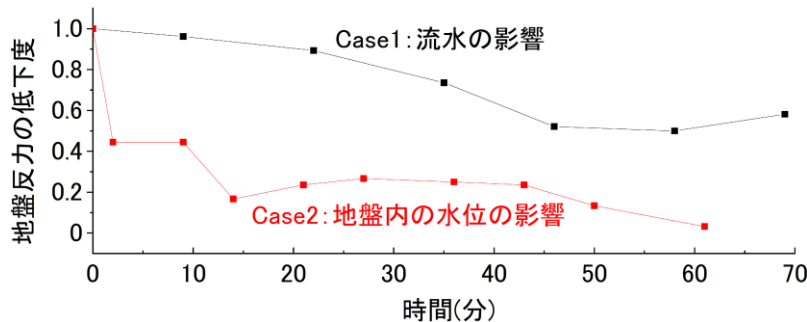


図 10 地盤反力係数の低下

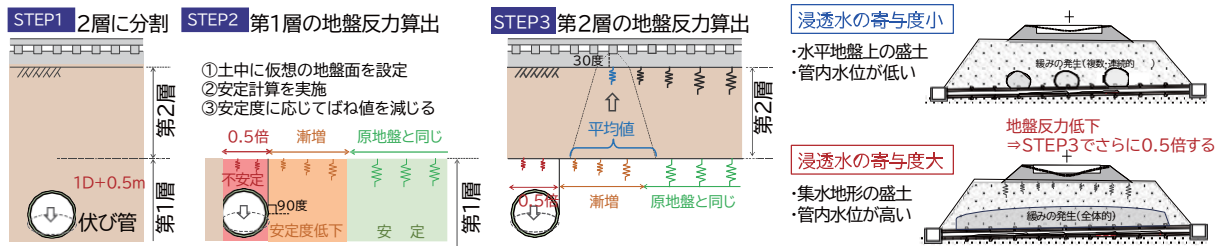


図 11 浸透水の影響を受ける伏びの地盤反力係数低下のモデル化

4. 地盤反力係数低下のモデル化と軌道への影響度判定チャートの作成

4.1 地盤反力係数低下のモデル化

数値解析では文献1で示した方法をもとに、盛土表面の地盤反力係数比の低減比を算定することとした。浸透水の影響を受ける伏びの地盤反力係数の低下を表現するモデルを図11に示す。以下ではこの低減を算定する各ステップの内容を示す。

- ・STEP1：ゆるみ領域上端を境界として盛土を2層（境界下側：第1層，境界上側：第2層）に区分する。
- ・STEP2：第1層上面の地盤反力係数比（初期の地盤反力係数を1としたときの比率）を、伏び端部を起点に90°の斜面があると仮定して斜面上の基礎理論から求める。
- ・STEP3：第2層上面のある位置にまくらぎを想定し、まくらぎ端部から30°の範囲に応力が伝播するとして、この範囲にある第1層上面の地盤反力係数比を平均化する。

なお、STEP2において、斜面近傍の基礎理論は鉄道構造物等設計標準・同解説（基礎構造物）⁵⁾に示されている、斜面近傍の極限支持力と平地上の極限支持力の比による地盤反力係数の補正係数の算定方法である。文献1ではこれを伏びの破損により緩みが生じる第1層において、伏びに隣接して90°の斜面があるとして適用した。

また、STEP3における30°の根拠としては、文献1において、直接基礎が不完全支持層下面で支持される場合の設計鉛直支持力の算出方法として、直接基礎から30°に広げた範囲で地中応力の分散を考慮していることから設定している。

浸透水の影響は、伏びに対する寄与度を大小で区分し考慮することとした。寄与度小については、主に水平地盤上に立地する盛土で管内水位が管径の半分以下となるような状況を想定している。2章で示した実際の鉄道盛土での試掘調査での小型FWD試験による地盤反力係数低下の結果を踏まえて伏び直上の緩み領域を1D+0.5mの範囲とし、その大きさを伏びのない箇所の地盤反力係数に対して0.5倍とした。また、寄与度大については集水地形に立地する盛土等で管内水が常時多い、あるいは盛土内に地下水位が形成されやすいような状況が該当すると考えられる。鉄道構造物等維持管理標準・同解説（構造物編）土構造物（盛土・切土）⁶⁾に示される不安定要因になるとされる盛土として、片切片盛、切盛境界、落込勾配点、谷渡り盛土、傾斜地盤上の盛土等でも影響が大きい場合と考えることが望ましい。模型実験の結果から、地表面付近で地盤反力係数も低下が確認されたことを踏まえ、盛土表面での地盤反力係数を0.5倍することとした。

4.2 影響度判定チャートの作成

4.2.1 解析条件

伏びの管径、土被りおよび盛土の物性に着目し、軌道への影響を簡易評価するためのチャート（影響度判

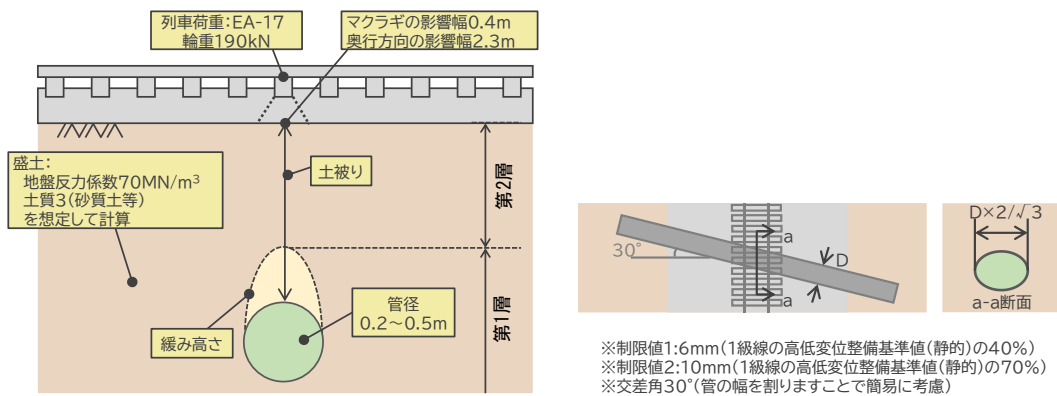


図 12 影響度判定チャートの作成条件

定チャート)を作成した。図 12 に計算の作成条件を示す。列車荷重については EA-17 の最大値とし、継目直下の場合も想定されることから、マクラギに軸重 190kN が作用する条件での計算とした。伏びの径は 0.2~0.5m とし、線路と斜角を有することも想定し、交差角 30° を考慮した。

盛土の物性値については、鉄道盛土においては性能ランク⁷⁾に応じて材料の種類を規定したうえで、施工時の締固め密度比と地盤反力係数 (K_{30} 値) に管理基準値を設定し、盛土の品質を確保している。そこで盛土の地盤反力係数については、在来線の盛土で一般的に適用される性能ランク II において要求される K_{30} 値 (70MN/m³) とした。また、斜面近傍の基礎理論では、すべり面の極限釣合い状態を上界の定理を用いて解くために内部摩擦角 ϕ および粘着力 c が必要であるが、その値としては鉄道盛土に用いる土質区分のうち相対的に土質が悪く軌道変位量が大きく算定されると想定される土質 3 (粒度配合の悪い砂礫, 砂質土等) を対象とすることとし、粘着力および内部摩擦角については既設鉄道盛土を対象とした既往の土質 3 の土質試験の平均値とした⁸⁾。

具体的な手算定順としては、ある土被りおよび管径の条件のもとで、地盤反力係数比算定モデルを活用して算出した地盤反力係数および所定の列車荷重を載荷し軌道沈下量を算出する。なお、繰返し載荷による累積沈下の増加等も考えられるが、本検討では考慮していない。この計算を様々な土被りと管径の条件で実施し、得られた軌道沈下量が限界値以下となる管径および土被りを求めてチャート化した。ここで、軌道沈下量の限界値は 2 段階を設定し、限界値については在来線の整備基準値 (1 級線, 高低変位, 静的値)⁹⁾である 15mm を基準とし、ここでは限界値①は 6mm, 限界値②は 10mm とした。

4.2.2 作成した影響度判定チャート

作成した影響度判定チャートを浸透水の寄与度の大小に区分して図 13 に示す。管径および土被りを変えて軌道の沈下量を算定し、沈下量の閾値を 6mm および 10mm とし、それぞれを影響小・中・大の 3 区分として整理した。管径や土被りが増加すると、軌道への影響大の範囲が大きくなる傾向となっている。図中には鉄道事業者が有する伏びと、過去に鉄道盛土で陥没災害を招いた伏びについて示している。浸透水の寄与度が大きい場合のチャートではほとんどの陥没事例が軌道への影響大と判定された範囲で発生しており、作成したチャートが過去の陥没災害を捕捉できていることがわかる。一方、浸透水の寄与度が小さい場合のチャートでは閾値となる線が上部にシフトしており、影響小・中に含まれる事業者が有する伏びが伏びの全数量に対してそれぞれ 10%・17%含まれることを確認した。

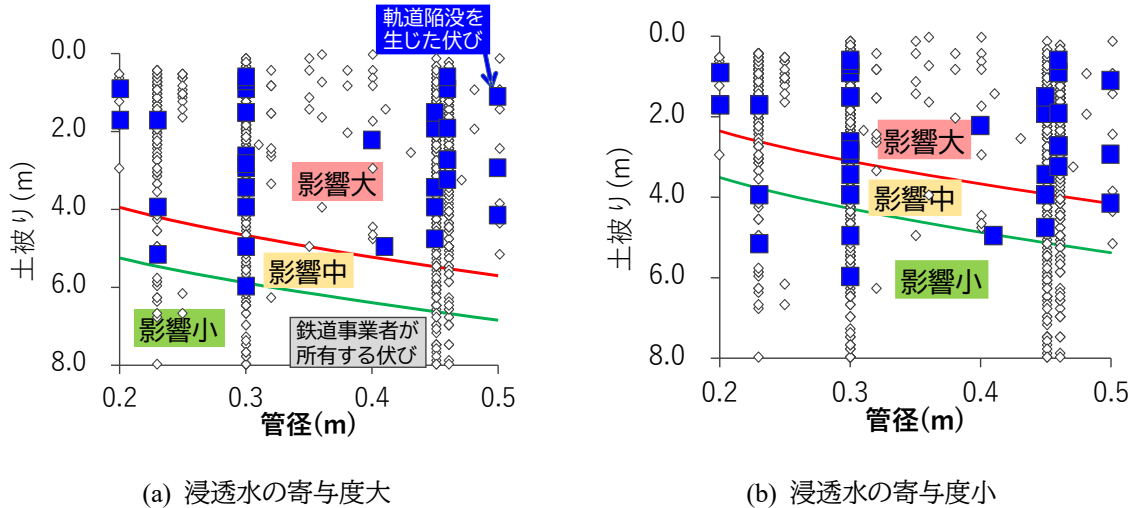


図 13 伏びが軌道に及ぼす影響度判定チャート

5. まとめ

本研究では、損傷を有する伏びへの浸透水が与える影響度を把握するとともに、これに起因する軌道の沈下予測に活用する地盤反力低下のモデル化を行い、軌道への影響度としてチャートを作成した。その結果、以下の知見を得た。

- 1) 陶管を有する鉄道盛土の試掘調査を行い、ひび割れや管周辺の空隙が存在するとともに、周辺地盤から細粒分が流出し、地盤反力が低下していることが確認された。
- 2) 模型実験によって、管内の流水や周辺地盤の地下水の上昇による土砂が管内に流出し、地表面の地盤反力が初期の半分程度にまで低下することがわかった。
- 3) 浸透水の影響度の大小に応じ、伏びの損傷が軌道沈下に及ぼす影響度を算定し、影響度を 3 段階に区分したチャートを作成した。

文 献

- 1) 大原勇, 仲山貴司, 三輪陽彦, 松丸貴樹, 杉山健太, 池島傑, 井上太郎: 伏び管の破損が鉄道盛土路盤部の地盤反力特性に及ぼす影響の評価に関する研究, 土木学会論文集, Vol.81, No.25, 24-00240, 2025
- 2) 桑野玲子, 堀井俊孝, 山内慶太, 小橋秀俊: 老朽下水管損傷部からの土砂流出に伴う地盤内空洞・ゆるみ形成過程に関する検討, 地盤工学ジャーナル, Vol.5, No.2, pp.349-361, 2010
- 3) 桑野玲子, 大原勇: 路面下空洞の生成・拡大メカニズムと陥没危険度の評価, 地盤工学ジャーナル, Vol.16, No.4, pp.307-317, 2021
- 4) 松丸貴樹, 佐藤武斗, 森裕昭, 天野友貴, 竹川遊大: 鉄道盛土内に埋設された小口径管からの土砂流出を模擬した降雨浸透・注水試験, 第 59 回地盤工学研究発表会講演概要集, 25-9-4-03, 2024
- 5) 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(基礎構造物), 丸善出版, 2012
- 6) 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)土構造物(盛土・切土), 丸善出版, 2007
- 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(土構造物), 丸善出版, 2007
- 8) 富田佳孝, 佐藤武斗, 松丸貴樹, 高木翔太: 既設盛土の耐震診断における盛土材料の簡易強度評価法, 地盤工学ジャーナル, Vol.19, No.3, pp.317-327, 2024
- 9) 鉄道総合技術研究所: 都市部鉄道構造物の近接施工対策マニュアル, 2007

携帯情報端末で取得した列車前方動画による 線路周辺空間の復元

梶原 和博* 田中 博文*

3D Reconstruction of Railway Track-side Environments Using Forward-Facing Smartphone Videos Captured on a Train

Kazuhiro KAJIHARA Hirofumi TANAKA

To address labor shortages and an aging workforce, this study investigates the use of train forward-facing videos captured by smartphones for efficient railway track maintenance. For this purpose, 3D spatial models of tracks and surrounding infrastructure were reconstructed using SfM-MVS techniques. The results suggest that these models have the potential to serve as low-cost, alternative or complementary tools for labor-intensive tasks, such as track alignment maintenance and construction surveying of railway facilities.

キーワード：列車巡視，スマートフォン，列車前方動画，SfM-MVS，3次元空間モデル

1. はじめに

生産年齢人口の減少や就業者の高齢化が進行する社会情勢において、老朽化する鉄道施設を適切に維持管理していくために、鉄道施設の検査・維持管理業務の省人化が喫緊の課題となっている。特に地域鉄道事業者は、予算、人員状況、人材育成、技術開発などの面で特に厳しい環境にあり、鉄道輸送の安全を確保していくための保守体制の継続が容易でない状況にあることが報告されている¹⁾。このような背景から、近年ではスマートフォン等の携帯情報端末（以下、携帯情報端末）を活用し、目視や体感に依存した列車巡視業務を低コストに省力化・高度化する手法が提案されている^{2) 3)}。また、携帯情報端末で測定した鉄道車両の振動を列車動揺管理に適用し、動的な軌道状態を高頻度に把握する検討も行われている^{4) 5)}。これらの事例では、加速度と同時に列車前方動画も取得可能な場合が多いが、列車前方動画は軌道状態や沿線環境の概況を目視で把握する際の補助手段としての活用に留まっている^{2) 3) 4)}。

一方、近年は列車の運転室内に仮設したビデオカメラまたは固定したステレオカメラを用いて、線路周辺の3次元空間情報を取得し、設備点検や列車巡視業務を効率化する手法が検討されている^{6) 7)}。ここで、列車前方動画の撮影に携帯情報端末を適用することができれば、比較的低コストに導入できることに加えて、1台の端末で加速度や位置情報等の多様なデータを同時に取得できるため、鉄道事業者の規模を問わず様々な検査・点検業務への活用が期待できる。一方、携帯情報端末は計測に特化した機器でないため、一般に列車前方動画の撮影に用いられる機器と比較してデータの保存容量に限りがある。そのため、列車前方動画の用途に応じて、適切な画質、フレームレート、画角等を検討する必要がある。

そこで、本研究では、携帯情報端末で取得した列車前方動画の活用に向けた基礎検討として、多視点の画像から対象物の3次元形状を推定するSfM-MVS技術^{8) 9)}を携帯情報端末で取得した列車前方動画に適用し、軌道および線路周辺の3次元空間モデルを作成した。そして、動画のデータ容量、SfMの解析時間、3次元空間モデルの作成効率等の観点から撮影方法を比較検証するとともに、得られた3次元空間モデルの精度検証や活用法の検討を行った。

* 軌道技術研究部 軌道管理研究室

2. 携帯情報端末で取得した列車前方動画を用いた3次元空間モデルの作成手法

2.1 SfM多視点ステレオ写真測量(SfM-MVS)の概要

SfM-MVS (Structure from Motion - Multi-View Stereo Photogrammetry) は、対象物を撮影した複数の画像から3次元空間モデルを作成する手法であり、SfMとMVSの2つの工程で構成される。SfMでは、対象物を撮影した複数枚の画像から共通する特徴点を抽出し、特徴点で構成される低密度の点群(以下、低密度点群)を生成するとともに、特徴点の位置関係を基にカメラの位置・姿勢やレンズの歪みなどの内部標定要素を推定する⁸⁾。MVSでは、SfMで推定した情報をもとに3枚以上の画像を同時に利用して多視点ステレオ計測を行い、対象物の高密度な点群やメッシュモデルを作成する⁹⁾。本研究では汎用のソフトウェアである3DFlow社製の3DF ZEPHYR¹⁰⁾(以下、SfM解析ソフト)を用いて、列車前方動画から画像フレームの抽出および抽出した画像フレームに対するSfM-MVS解析を行った。なお、解析に用いたPCは、CPUとしてIntel Corei9-9900K(3.60GHz, 8コア, 16スレッド)、GPUとしてNVIDIA GeForce RTX 2080 Tiを搭載しており、SfM解析ソフトはWindows11 Pro上で実行した。

2.2 列車巡視支援アプリの概要

携帯情報端末を用いた列車前方動画の取得にあたり、列車巡視支援アプリケーション「Train Patroller」²⁾(以下、既開発APP)を使用した。図1に既開発APPの動作イメージを示す。既開発APPは、Apple社製のiOSを搭載した携帯情報端末で動作するアプリケーションであり、携帯情報端末に内蔵された各種センサを用いて、表1に示す計測項目を取得することができる。各計測項目はサンプリングレートが異なるが、同時に記録されるため、適切なサンプリング処理によって同期させることが可能である²⁾。また、動画の撮影条件として、フレームレートは10, 20, 30, 60fps、画質はVGA, HD, Full HD, 4Kを選択可能である。このうち、VGA画質の動画は、列車前方動画の活用に対して解像度が不十分と考えられたため、本研究ではHD画質以上の列車前方動画を検討対象とした。

表1 既開発APPの主な計測項目



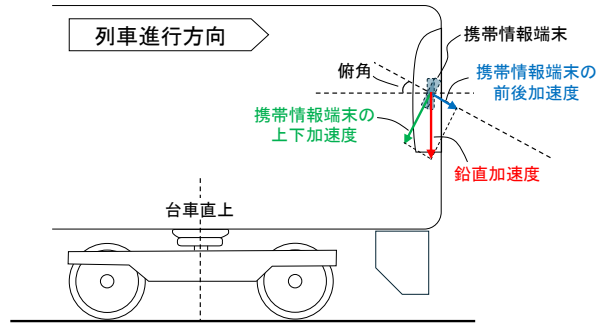
図1 既開発APPの動作状況のイメージ

センサ	計測項目	計測モード			サンプリングレート (ファイル形式)
		振動	振動&動画	動画	
GPS レーザー	列車速度	○	○	○	1Hz (txt形式)
	緯度・経度	○	○	○	
モーションセンサ	加速度(3軸)	○	○	—	100Hz (txt形式)
	角速度(3軸)	○	○	—	
カメラ(背面)	動画	—	○	○	10/20/30/60fps (mp4形式)
マイクロフォン	音声	○	○	○	44.1kHz (m4a形式)

図2に、携帯情報端末を鉄道車両へ設置する方法の例を示す。同図(a)に示すように、携帯情報端末を鉄道車両の前頭のフロントガラス面に吸盤式の治具を用いて固定することで、任意の画角で列車前方動画を撮影することができる。一方、この設置方法で加速度を同時に計測する場合、鉛直方向の加速度は、鉄道車両のピッチングの影響等により、列車動揺の測定位置として推奨¹¹⁾される台車直上での計測値と比較して、5~15%程度大きくなることが知られている⁴⁾。また、携帯情報端末を水平面に対して傾斜角(以下、俯角)を付けて設置した場合、携帯情報端末の上下方向の加速度は、同図(b)に示すように鉛直方向の加速度と一致しないため、携帯情報端末の上下・前後方向の加速度のベクトル合成により補正することが望ましい²⁾。



(a) 鉄道車両の前頭への設置方法の例



(b) 俯角と加速度の関係

図2 携帯情報端末の鉄道車両への設置方法の例



(a) 俯角 9°



(b) 俯角 27°

図3 列車前方動画から抽出した画像フレームの例

2.3 撮影試験の概要

本研究では、鉄道総合技術研究所内の試験線において、既開発 APP をインストールした携帯情報端末（Apple 社製、iPhone15 Pro）を、車両の運転台中央のフロントガラスに吸盤治具を用いて固定し、列車前方動画を撮影した。撮影区間は、直線と曲線（最小曲線半径は $R=160\text{m}$ ）で構成され、延長は約 700m である。また、撮影時の車両の速度は 40km/h 程度以下であり、各撮影で車両の運転曲線（ランカーブ）は概ね同一である。

撮影試験では、既開発 APP の計測モードを「振動&動画」とし、表 1 に示した項目を収録した。撮影時は既開発 APP で動画のフレームレートを 60fps に固定し、画質（HD, Full HD, 4K）と携帯情報端末の俯角（ 0° , 10° , 30° を目標に設定）を都度変更しながら、列車前方動画を複数回撮影した。なお、携帯情報端末の俯角は図 2(a) に示した吸盤治具で調整するが、実際の俯角を上述した設定目標値と厳密に一致させることが困難なため、以降の検討では既開発 APP の水準器機能で確認した実際の俯角を示す。

図 3 に列車前方動画から抽出した画像フレームの例を示す。俯角 3° （設定目標値 0° ）および図 3(a) に示す俯角 9° （設定目標値 10° ）は軌道周辺および沿線環境、図 3(b) に示す俯角 27° （設定目標値 30° ）は主に軌道部材状態の確認へ活用することを想定して、本検討で設定した撮影方法である。

3. SfM-MVS における各種撮影条件の影響

3.1 動画のデータ容量

既開発 APP で取得したデータは携帯情報端末の内部ストレージに保存されるため、撮影した動画のデー

タ容量は必要最小限であることが望ましい。図4に撮影試験において既開発APPで取得した動画のデータ容量の一例を示す。iPhone15 Proで動画を撮影した場合、動画のデータ容量を決めるビットレートは撮影時の外部環境や携帯情報端末の内部処理等に依存する。撮影試験で取得した動画(60fps)のビットレートは、4K画質で54~93Mbps、Full HD画質で15~26Mbps、HD画質で9~12Mbpsの範囲でばらついた。そこで、同図に用いたビットレートは、4K画質(60fps)で70Mbps、Full HD画質(60fps)で20Mbps、HD画質(60fps)で10Mbpsとし、60fps以外の動画のビットレートは、画質ごとに上述したビットレートにフレームレートの比率を乗じた値を示している。この場合、4K画質で撮影した動画のビットレートはFull HD画質の3.5倍、撮影時間60分あたりのデータ容量は4K画質(60fps)で約31GB、Full HD画質(60fps)で約9GBとなる。この結果から、4K画質の動画の利用は、携帯情報端末の内部ストレージ容量やデータ伝送負荷の観点で制約を伴うことが想定される。

3.2 SfMに要する解析時間

SfM-MVSによる一連の解析には数時間を要する場合があるため、解析時間を考慮して列車前方動画の撮影条件を検討することが望ましい。そこで、撮影試験で取得した列車前方動画を用いて、列車前方動画の画質が低密度点群の作成に要する時間(以下、SfM解析時間)に与える影響を検証した。

図5に、SfM解析時間と画像フレーム数の関係を示す。同図の横軸は、SfM解析ソフトを用いて列車前方動画(俯角3°)から所定のフレームレート(10, 20, 30, 60fps)で抽出した画像フレーム数である。ここで、同一画質では同じ列車前方動画をSfMに用いているため、画像フレーム数の増加はフレームレートの増加に対応する。同図の近似曲線(指数関数)に示すように、SfMに用いる画像フレーム数が多いほどSfM解析時間は指数関数的に増加した。また、画像フレーム数が同等の場合、解析時間はHD画質が最も少なく、4K画質はHD画質と比べて大幅に増加するものの、Full HD画質との差は限定的であった。

なお、図5に示すデータプロットは、画質ごとに列車前方動画の撮影時期が異なるため、SfM解析時間の傾向は動画撮影時の日照条件等の環境要因の影響を含む可能性が考えられる。この点については、リサイズ処理によって画質を変換した同一動画を用いた検証を別途実施しており、今回の試験条件においては、列車前方動画の撮影環境の違いがSfM解析時間に与える影響が小さいことを確認している¹²⁾。

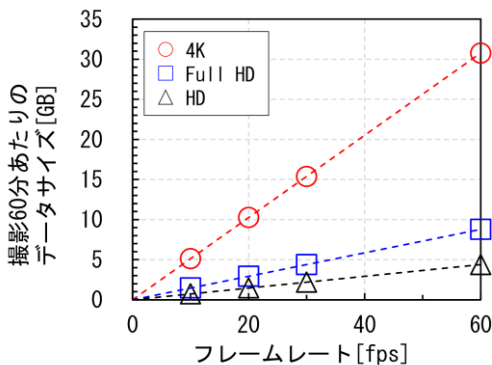


図4 動画データ容量の例

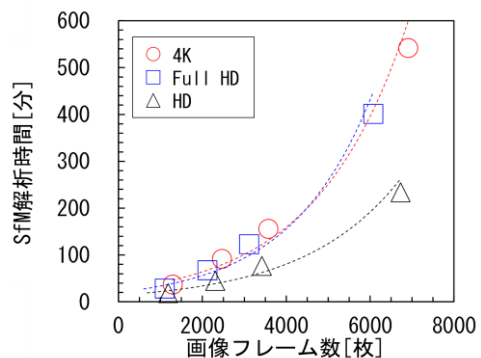


図5 SfM解析時間と画像フレーム数の関係 (俯角3°)

3.3 低密度点群の点群数

一般にSfM-MVSで対象物の形状を復元する場合、特徴点が多いほど対象物の形状を詳細に再現できる。そこで、撮影試験で取得した列車前方動画を用いて、列車前方動画の画質が低密度点群の点群数(以下、低

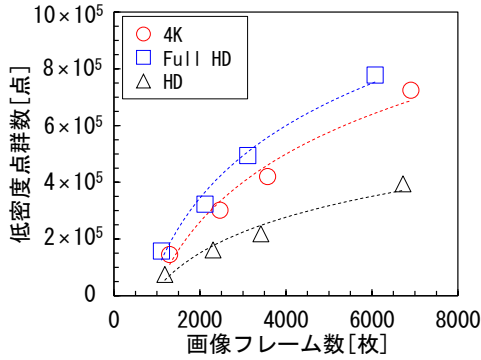


図6 低密度点群数と画像フレーム数の関係 (俯角 3°)

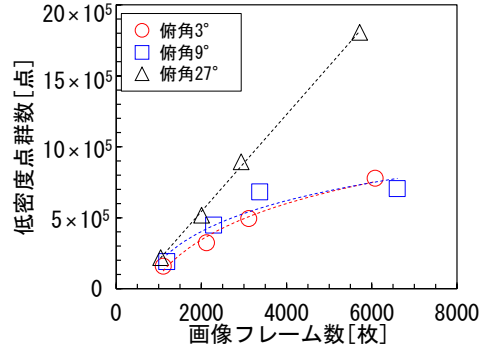


図7 低密度点群数に対する俯角の影響 (Full HD 画質)

密度点群数) に与える影響を検証した。

図6に、低密度点群数と画像フレーム数の関係を示す。同図のデータセットの構成および SfM に用いた列車前方動画は、図5と同様である。図6では近似曲線(対数関数)も示しており、SfM に用いる画像フレーム数が増加するにつれて低密度点群数の増加が緩やかになることがわかる。この傾向は、画像フレーム数が多いほど連続する画像間の視差が小さくなり、画像フレーム間で共通する特徴点を見つけやすいという SfM の特性¹³⁾ と整合する。一方、画像フレーム数が同程度の場合、低密度点群数は HD, 4K, Full HD 画質の順に増加し、有効画素数に比例しない傾向が見られた。本傾向は、使用する画像フレームの有効画素数が多いほど、画像フレーム間で特徴点を対応付ける際に有利であるという一般的な傾向⁸⁾ と異なる。この要因として、今回使用した SfM 解析ソフト内部のアルゴリズムが影響している可能性も考えられるため、様々な撮影条件を考慮して本要因を詳細に検証する予定である。

なお、図6に示すデータプロットは、3.2節と同様に画質ごとに列車前方動画の撮影時期が異なるため、低密度点群数の傾向は動画撮影時の日照条件等の環境要因の影響を含む可能性がある。そこで、リサイズ処理によって画質を変換した同一動画を用いた検証を別途実施しており、今回の試験条件においては、列車前方動画の撮影環境の違いが低密度点群数に与える影響が小さいことを確認している¹²⁾。

3.4 携帯情報端末の俯角の影響

携帯情報端末で列車前方動画を撮影する場合、確認したい対象物に応じて携帯情報端末の俯角を設定することが考えられる。そこで、携帯情報端末の俯角が低密度点群数に与える影響を検証した。

図7に、低密度点群数と画像フレーム数の関係を携帯情報端末の俯角で整理した結果を示す。同図には、3.3節で低密度点群数が最も多かった Full HD 画質の列車前方動画に対する SfM の結果と、直線または対数関数に基づく近似線を示す。同図より、俯角 9° (設定目標値 10°) 以下の場合には、SfM に用いる画像フレーム数の増加に伴って、低密度点群数が対数関数的に増加する傾向が見られた。一方、俯角 27° (設定目標値 30°) の場合は、低密度点群数は画像フレーム数の増加に伴って線形に増加する傾向にあった。この要因として、本試験の撮影条件では、俯角が大きいほど画像フレーム全体に占める軌道周辺の領域が広くなり、被写体の分解能が高くなることで特徴点を検出しやすくなった可能性が考えられる。

4. 3次元空間モデルの活用法の検討

列車前方動画から抽出した画像フレームに SfM-MVS を適用することで、列車前方動画の撮影経路の推

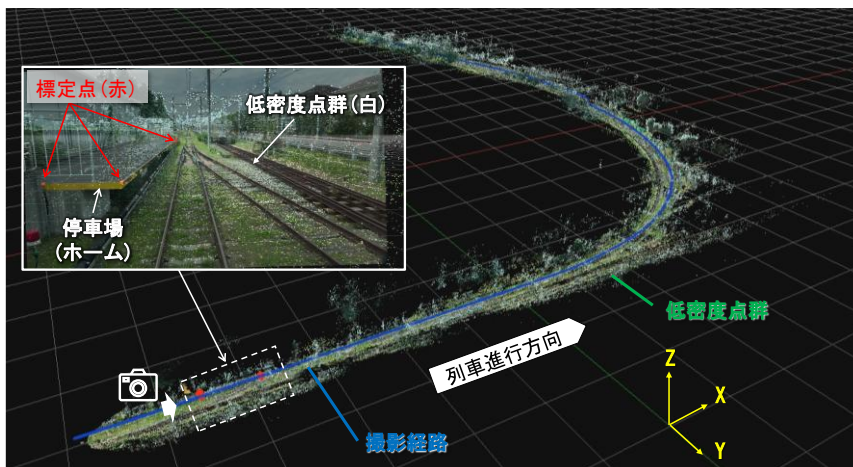
定と、軌道および線路周辺の3次元空間モデルの作成を行うことができる。本研究では、携帯情報端末で取得した列車前方動画の活用方法として、SfMによって推定された列車前方動画の撮影経路の利用と、SfM-MVSによって作成された3次元空間モデルを利用した寸法計測の可能性について検討した。

以降の検討では、前章までの検証結果を踏まえ、SfM解析時間を低減しながら低密度点群を効率的に作成できる条件として、Full HD画質で撮影した列車前方動画から30fpsで抽出した画像フレームをSfM-MVSに適用した。なお、SfMで得られる3次元情報は、任意の点を基準とした相対的な座標系に基づいており、スケールが不定である。そこで、後述するように列車前方動画で視認できる寸法が既知の標定点を用いて、SfMの結果に実物大のスケールを付与するジオリファレンスと呼ばれる処理を行っている。

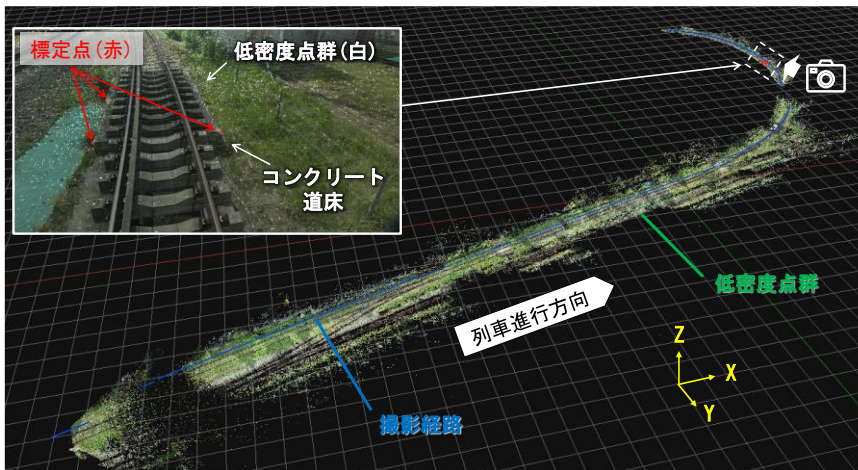
4.1 撮影経路の活用

図8に、俯角 9° および俯角 27° の列車前方動画に対して、SfMで推定した列車前方動画の撮影経路と低密度点群の例を示す。各図には、列車前方動画から抽出した画像フレーム上に、ジオリファレンスに用いた3点の標定点を示している。これらの図に示すように、俯角 9° の場合は停車場(ホーム)の角部(図8(a))、俯角 27° の場合はコンクリート道床の角部(図8(b))に標定点を3点設定した。

図8(a)に示すように、俯角 9° の場合は、撮影経路と低密度点群が連続的に生成されていることがわかる。一方、図8(b)に示すように、俯角 27° の場合は、図8(a)と比較して撮影経路は不連続となり、低密度点群(特



(a) 俯角 9°



(b) 俯角 27°

図8 SfMで推定した列車前方動画の撮影経路と低密度点群の生成例

徴点)の未検出領域が多い傾向にあった。この要因として、俯角を大きく設けた場合は画像フレームの領域が軌道周辺に限定されるため、連続する画像フレーム間で特徴点の移動量が大きくなり、特徴点の検出に対する冗長性が低下した可能性が考えられる。また、特徴点の分布が軌道周辺に沿って平面的に分布したことで、カメラの内部標定要素や高さ方向の位置の推定精度が低下した可能性も要因として考えられる。

図9に、俯角9°の列車前方動画に対してSfMで推定した撮影経路と、携帯情報端末のGPSで取得した鉄道車両の移動経路の比較を示す。同図では、これらの位置情報を国土地理院の電子国土基本図¹⁴⁾(オルソ画像)上に表示している。同図より、SfMで推定した撮影経路はGPSで測位した走行経路と概ね一致し、比較的正確に撮影経路を推定できていることがわかる。一方、同図に示す踏切付近では、SfMで推定した撮影経路にドリフトが生じており、同地点以降の走行経路はGPSの測位結果とのずれが大きくなっていた。このドリフトが発生した箇所では、連続する画像フレーム間で共通する特徴点を検出できておらず、SfMの推定精度が低下していたと考えられる。



図9 SfMとGPSによる走行経路の比較例(俯角9°)

このように、SfM-MVSに適した俯角で撮影した列車前方動画を用いることで、鉄道車両の走行経路と軌道および線路周辺設備の3次元形状を一元的に把握できると考えられる。これらの情報を活用することで、線路の平面線形や線路設備の位置、寸法の把握が容易となり、線路設備台帳の整備を効率化できる可能性がある。

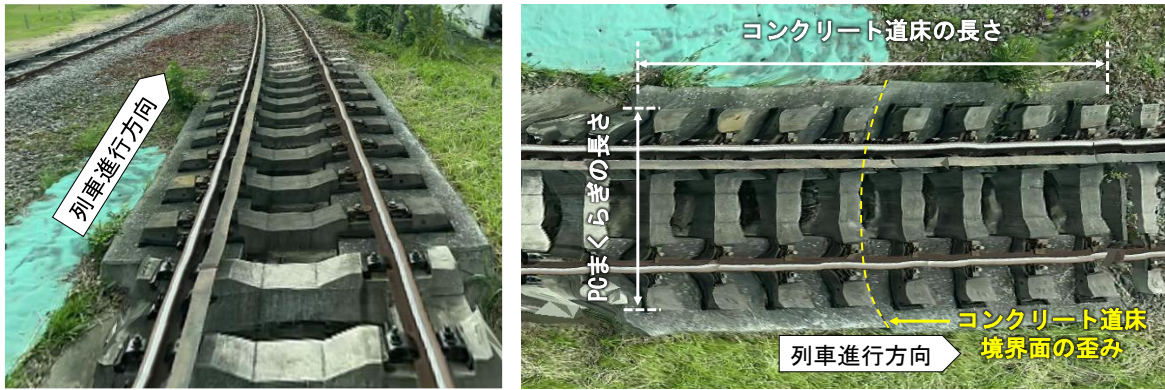
4.2 3次元空間モデルを利用した寸法計測

SfM-MVSによって作成した3次元空間モデルの寸法精度を確認するため、試験区間に介在する寸法が既知の直結系軌道の部材を対象に、モデルの寸法と実測値の比較を行った。

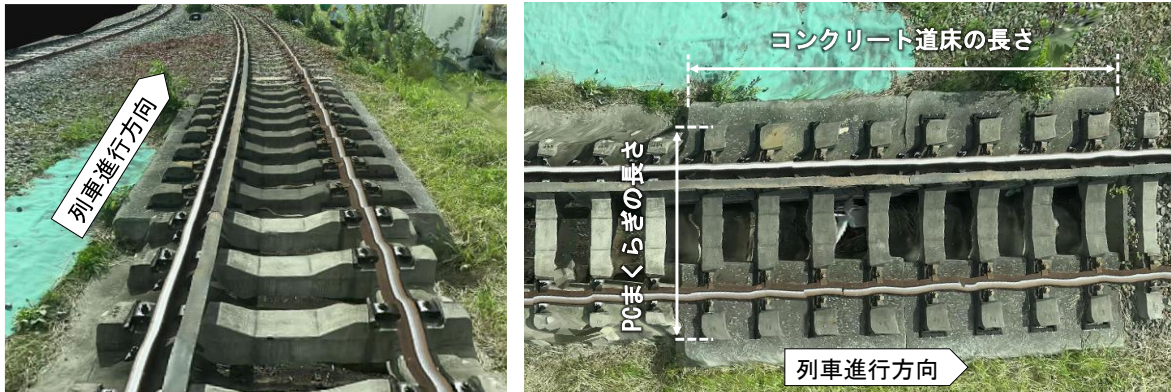
図10に、D型弾性まくらぎ直結軌道のテクスチャ付3次元メッシュモデルを示す。同モデルは、図8に示した低密度点群に対して、MVSにより作成した高密度なメッシュモデルである。同図に示すように、携帯情報端末の俯角によらず、作成したモデルはまくらぎおよびコンクリート道床の端部の位置を把握可能なメッシュサイズを有していた。

軌道各部の形状に着目すると、図10(a)に示す俯角9°の場合は、レールの歪みは少ないがコンクリート道

床の境界面に歪みが見られた。一方、図 10(b)に示す俯角 27° の場合は、俯角 9° の場合と比べてレールの歪みは大きいですが、コンクリート道床の境界面の歪みは小さかった。ここで、図 10 に示すコンクリート道床の長さ（実測値 4995mm）を 3 次元メッシュモデル上で計測した結果、俯角 9°（図 10(a)）の場合は 4960mm（誤差-35mm）、俯角 27°（図 10(b)）の場合は 4410mm（誤差-585mm）となった。同様に PC まくらぎの長さ（実測値 2000mm）を計測した結果、俯角 9°（図 10(a)）の場合は 1990mm（誤差-10mm）、俯角 27°（図 10(b)）の場合は 2150mm（誤差+150mm）となった。このように、俯角 9° の場合はいずれの寸法も実測値に対して 50mm 以内の誤差で推定可能であったが、俯角 27° の場合は俯角 9° と比べて実測値との誤差は大きくなった。これらの結果は、図 8 に示した SfM による撮影経路の推定結果を反映しており、俯角 27° の場合におけるカメラの内部標定要素の推定精度が不十分である可能性がある。したがって、3 次元空間モデルの寸法精度を向上させるためには、俯角に応じて標定点の配置や数量を適正化し、内部標定要素の推定精度を改善する必要があると考えられる。



(a) 俯角 9°



(b) 俯角 27°

図 10 D 型弾性まくらぎ直結軌道のテクスチャ付 3 次元メッシュモデル

図 11 に、俯角 9° の列車前方動画から作成した踏切周辺のテクスチャ付 3 次元メッシュモデルの例を示す。同図に示すように、作成したモデルは線路周辺にかけて地物の形状を復元できており、線路周辺における面積や体積の算出にも活用できる可能性がある。

以上に述べたように、3 次元空間モデルの寸法精度は携帯情報端末の俯角によって異なるが、携帯情報端末で撮影した列車前方動画であっても、SfM-MVS を適用することで一定の寸法精度で軌道および線路周辺の 3 次元空間モデルを作成可能であることを確認した。本手法で作成したモデルは、徒歩巡視や現場調査の補助あるいは代替手段として活用できる可能性がある。

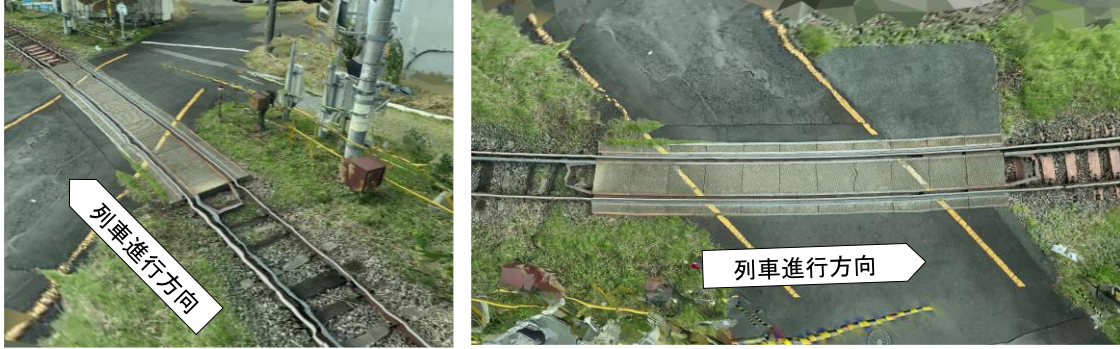


図 11 踏切周辺のテクスチャ付 3 次元メッシュモデルの例（俯角 9°）

5. まとめ

本研究では、携帯情報端末で取得した列車前方動画を軌道の維持管理業務へ活用するための基礎検討として、列車巡視支援アプリケーションで撮影した列車前方動画に SfM-MVS を適用し、軌道および線路周辺の 3 次元空間モデルを作成した。主な結果を以下に示す。

- (1) SfM の解析に要する時間は、列車前方動画の画像フレーム数を増やす（フレームレートを上げる）ほど指数関数的に増加する傾向が得られた。また、画像フレーム数が同等の場合は、列車前方動画の画質が高いほど増加する傾向にあったが、4K 画質と Full HD 画質の場合では解析時間の差異は限定的であった。
- (2) 3 次元空間モデルを構成する低密度点群の点群数は、列車前方動画の画像フレーム数を増やす（フレームレートを上げる）ほど対数関数的に増加する傾向が得られた。ただし、列車前方動画の画質が Full HD 以上の場合は、点群数に画質による大きな差異は見られなかった。
- (3) 列車前方動画（Full HD 画質）に SfM を適用した結果、列車の走行経路を一定の精度で推定できた。この結果と SfM-MVS で作成した 3 次元空間モデルを併用することで、線路の平面線形や設備の寸法・位置を一元的に把握することができ、線路設備台帳の整備を効率化できる可能性がある。
- (4) 列車前方動画（Full HD 画質）に SfM-MVS を適用し高密度な 3 次元メッシュモデルを作成した結果、モデルの寸法精度は携帯情報端末の俯角によって異なるが、軌道部材の寸法計測に対して一定の精度を有しており、現場調査の補助あるいは代替手段として活用できる見通しを得た。

今後は、SfM-MVS によって作成した 3 次元空間モデルの寸法精度を向上させる手法や、線路設備台帳の整備等への活用に向けた具体的な手法について、検討を進める予定である。

文 献

- 1) 土木学会・インフラメンテナンス（鉄道）特別委員会：鉄道インフラの健康診断と将来のメンテナンスに向けた提言，2020
- 2) 田中博文，趙博宇，蘇迪，長山智則：携帯情報端末を活用した低コストな列車巡視支援方法の開発，鉄道総研報告，Vol.39，No.1，pp.21-27，2025
- 3) 池内三津喜，田中浩平：スマートフォンを活用した線路保守システムの開発，サイバネティクス，Vol.28，No.1，pp.22-27，2023
- 4) 田中博文，蘇迪，長山智則：携帯情報端末を活用した低コストな軌道状態管理に関する基礎的検討，鉄道工学シンポジウム論文集，Vol.22，pp.39-46，2018
- 5) 篠田憲幸，網島均，松本陽，佐藤安弘，緒方正剛：携帯情報端末を用いた営業列車振動データにもとづく軌道管理手法，日本機械学会論文集，Vol.88，No.911，No.21-00375，2022
- 6) 三島健吾，川崎恭平，昆野修平，斉藤大樹，三和雅史：軌道の維持管理の省力化のための列車前頭画像による軌道状態管理法，

第 25 回鉄道工学シンポジウム論文集, Vol.25, pp.123-130, 2021

- 7) 振津勇紀, 出口大輔, 川西康友, 井出一郎, 村瀬洋, 向嶋宏記, 長峯望: SfM-student:SfM 法を用いたデータ拡張による列車前方映像からのセマンティックセグメンテーション, 電子情報通信学会論文誌 A, Vol.J105-A, No.4, pp.48-57, 2022
- 8) 織田和夫: 解説: Structure from Motion (SfM) 第一回 SfM の概要とバンドル調整, 写真測量とリモートセンシング, Vol.55, No.3, pp.206-209, 2016
- 9) 織田和夫: 解説: Structure from Motion (SfM) 第二回 SfM と多視点ステレオ, 写真測量とリモートセンシング, Vol.55, No.4, pp.259-262, 2016
- 10) 3Dflow 3DF ZEPHYR Documentation : <https://www.3dflow.net/technology/documents/3df-zephyr-documentation/> (参照日: 2025 年 8 月 26 日)
- 11) 鉄道総合技術研究所編: 鉄道構造物等維持管理標準 (軌道編) の手引き, 2007
- 12) 梶原和博, 田中博文: 携帯情報端末で取得した列車前方動画に SfM-MVS 技術を適用した 3 次元空間モデルの作成, 第 29 回鉄道工学シンポジウム論文集, Vol.29, pp.15-22, 2025
- 13) 板倉健太, 鎌倉以直, 細井文樹: ライダーおよび SfM を用いた地上における植生の 3 次元計測手法の比較研究, Eco-Engineering, Vol.30, No.1, pp.15-20, 2018
- 14) 国土地理院ウェブサイト: <https://maps.gsi.go.jp/development/ichiran.html> (参照日: 2025 年 8 月 26 日)

鉄道総研報告
RTRI REPORT

列車前方画像を用いた駅ホーム高さ・離れ計測手法の開発

松岡 弘大* 中田 悠貴** 加藤 聖***

Development of a Method for Measuring Platform Height and Gap Using Forward-View Train Images

Kodai MATSUOKA Yuki NAKADA Sho KATO

This study proposes a method for measuring platform height and gap using forward-facing images captured by commercial trains. The method employs ground markers to identify coplanar regions in the image depth direction. An algorithm was developed to automatically estimate platform height and gap from these images. Field tests were then conducted on a commercial railway line to evaluate its accuracy and practical applicability. The results indicated that while gap errors remained within 10 mm at five of the seven locations, height errors exceeded 10 mm at five. The sources of these errors were analyzed, and potential strategies for improvement are also proposed.

キーワード：列車前方画像，駅ホーム計測，画像計測，現地試験

1. はじめに

労働人口の減少が進む中で課題となっている鉄道設備の保守業務省人化を進めるため、既存業務の調査やデジタル技術の活用、系統横断でのデータ共有などが進められている。例えば、四国旅客鉄道株式会社（以下、JR 四国）では、現在実施されている保守業務の内容や費用・労働力の投入量が調査され^{1) 2) 3)}、既存業務を効率化できる可能性のある新技術の考察がされている。田尾ら²⁾は、保線系統における列車巡視時の軌道状態把握に携帯情報端末のカメラで撮影した動画⁴⁾（以下、列車前方画像）を利用できることを指摘し、実業務での列車前方画像の取得と、得られた画像に基づく劣化や変状の判定手法の開発が進められている^{5) 6) 7)}。また、列車前方画像とともに記録できる加速度を用いた動揺管理への活用も模索されている⁸⁾。加えて、ある系統が取得した維持管理情報を他系統へ共有・活用可能とする統合分析プラットフォーム^{9) 10)}の開発と試行も進められており、系統を問わず保守省力化のために前方画像を活用可能な環境が整いつつある。

このような状況の中、矢野ら¹⁾は土木系統を対象として、既存業務の実態調査結果を整理し、列車前方画像の活用による省力化効果が大きい業務として、駅ホームの高さ・離れ計測をあげている。この駅ホームの高さ・離れは4年に一度、各駅ホームに対して5mもしくは10m間隔で計測される。また、軌道整正の実施後や輸送繁忙期前などにも実施されるが、技術者が専用機器を用いて地上で直接計測しており、多大な労力を要している。したがって、系統横断でのデータ共有により利用可能な列車前方画像から画像処理により駅ホームの高さ・離れを計測できれば現地へ行く手間も含めて大幅な省力化が見込まれる。ただし、列車前方画像では画像奥行方向の位置推定精度が低く、駅ホーム高さ・離れを十分な精度で計測できないといった課題が存在した。

本研究では、列車前方画像を用いた高精度な駅ホーム高さ・離れ計測を実現するために、画像奥行方向の同一平面を認識する基準として地上マーカを用いる手法を提案する。また、列車前方画像から自動的に駅ホーム高さ・離れ計測を行うアルゴリズムを開発するとともに、実路線での検証試験を実施し、提案手法

* 情報通信技術研究部 情報解析研究室

** 構造物技術研究部 コンクリート構造研究室

*** 四国旅客鉄道株式会社

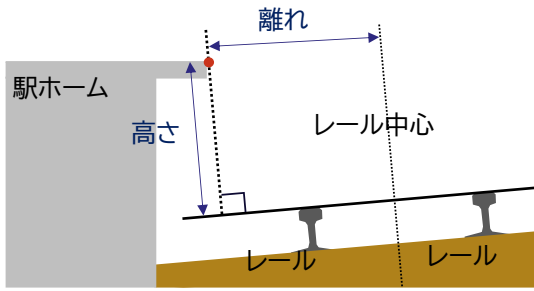


図1 駅ホーム高さ・離れの管理値の定義



図2 駅ホーム高さ・離れの計測方法の例

の精度や有効性，課題について整理した。

2. 駅ホーム高さ・離れ計測と既往研究

2.1 駅ホーム高さ・離れ計測

駅ホームは列車に近接する設備であるため，レールからの離れおよび高さを比較的精緻に管理する必要がある。図1に駅ホーム高さ・離れの管理値の定義を示す。駅ホーム高さは両レール頭頂部からホーム上面端（図中赤点）までの高さであり，両レール頭頂部を通る直線に対して定義される。駅ホーム離れはレール中心からホーム上面端までの距離である。既存業務では図2に示すような接触式の機器¹¹⁾により地上から手作業で計測される場合も多い。接触式の機器自体が有する計測精度は±1mm程度である¹¹⁾。このほか，地上から非接触で計測可能なレーザ距離計¹²⁾や光切断法などの3次元形状計測を用いた計測手法^{13) 14)}も開発されている。接触式と比較した誤差は文献12および13ともに1mm程度となっている。

2.2 既往研究

駅ホームの位置計測技術の多くは，建築限界¹⁵⁾確認の観点から開発されてきた。近年では特に省力化効果の大きい手法として車上からの計測手法が検討されており，LiDAR¹⁶⁾などのレーザスキャナを搭載したMMS（Mobile Mapping System）による誤差10mm程度の計測手法^{17) 18)}が開発されている。列車前方画像を用いた車上計測はMMSと比較して低コストで実現可能であり，ステレオカメラを用いた支障物検出手法¹⁹⁾，単眼ステレオ技術によるホーム高さ・離れ計測手法²⁰⁾が提案されている。ただし，携帯情報端末のような単眼での撮影では奥行き方向の位置推定に課題があり，文献20では平均誤差でも40mmを超えることが報告されている。

本研究で現地試験を実施したJR四国の健全度区分では，離れについて10mm程度で異なる健全度に区分される場合が存在する。これを踏まえると，許容される誤差は最大でも10mm程度と考えられ，携帯情報端末のカメラを用いた安価な手法での既存業務の置き換えは困難な課題であるといえる。本研究では，携帯情報端末で撮影された列車前方画像から高精度にホーム高さ・離れを推定するため，駅ホームおよび対応するまくらぎに独自の地上マーカを設置し，これを利用して奥行き方向の位置推定に関する問題を回避し，誤差10mm以下となるような高精度なホーム高さ・離れ計測手法の開発を試みた。

3. ホーム高さ・離れ計測手法

3.1 地上マーカの製作

列車前方画像は2次元であるため，画像内の奥行き方向となるホーム位置と対応するレール位置を高精度

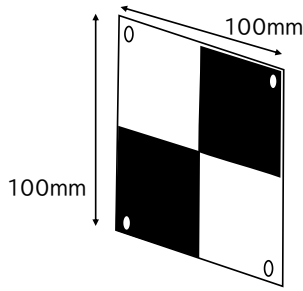


図3 ホームマーカ

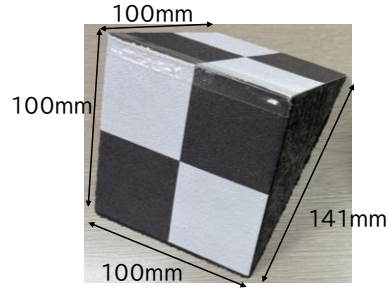


図4 まくらぎマーカ



図5 マーカ設置状況

に推定することが難しい。そこで計測対象とするホーム位置とそこに対応するレール位置に地上マーカを設置することで、精度確保が難しい奥行方向の位置推定に関する問題を回避し、単純な2次元画像処理問題に帰着させることで高精度化を図る。本研究では、予備試験を実施したうえで、図3および図4に示すホームマーカおよびまくらぎマーカを製作した。図3に示すホームマーカは厚さ1mm、縦横100mmのアルミ板で製作した。白黒格子は列車前方画像での視認性の観点からそれぞれ50×50mmとしている。本マーカはホーム計測箇所のホーム上端側面にアンカーにより設置する。図4に示すまくらぎマーカは絶縁性や他作業への支障を最低限にする観点、および上下どちらの列車からも検知できるように三角柱の樹脂製とした。起点および終点側の100mm×100mmの2面にホームマーカと同じ白黒格子を工業用シールにより設置している。まくらぎマーカは接着剤によりまくらぎ両端上面に設置する。ホームマーカ上端からホーム上端までの距離、まくらぎマーカ上端からレール頭頂部までの距離は変化しないと仮定し、マーカ設置時に別途計測のうえ記録しておき、以下で説明する列車前方画像によるホーム高さ・離れ計測に利用する。

3.2 地上マーカの検知

列車前方画像から上述のマーカを利用して駅ホーム高さ・離れを計測するためには、長い動画内から地上マーカが存在する画像および画像内のホームマーカおよびまくらぎマーカの大まかな位置を特定する必要がある。本研究では今後の自動化を見据え、機械学習を利用してホームマーカおよびまくらぎマーカとそれらの大まかな位置を自動で抽出できるようにした。

本研究ではマーカ検出のためのネットワークアーキテクチャとしてYOLOv4²¹⁾を用いた。YOLOv4は深層学習における物体の検出と識別を同時に実施するネットワークモデルであり、画像から物体カテゴリ、カテゴリクラスの信頼度、横位置座標、縦位置座標、横幅、縦幅が得られる²¹⁾。本研究では、ホームマーカおよびまくらぎマーカ設置後の列車前方画像3580枚を利用し、これらの画像内に写ったホームマーカおよびまくらぎマーカ計19954個に対して正解値を付与するアノテーションを行った。また、画像内で斜めにゆがむ傾向にあるホームマーカの検知精度を上げるため、学習にはせん断変形させた画像を1割程度混



図6 YOLOv4によるマーカ検知の例

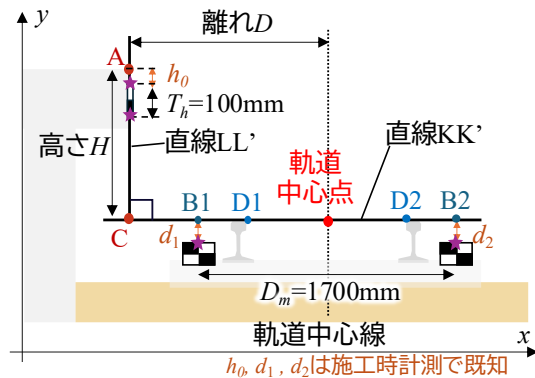


図7 高さ・離れ計測用の座標系

入させた。そのほか、影などの影響を抑制するために彩度、明度、コントラストをランダムに修正した学習用画像を混入させている。図6に構築したYOLOv4による地上マーカの検知例を示す。未使用のテストデータ(113枚)を用いた検証の結果、適合率82.3%、再現率84.0%、F値83.1%で地上マーカを検知できることを確認している。なお、検知できていない場合のほとんどはマーカが画像上側の遠方にある場合であり、列車が接近しマーカに近づいた状況ではほぼ100%マーカを検知できる。

3.3 画像処理手法

3.3.1 地上マーカ位置・寸法の同定

図6に示す通り、前節で示したYOLOv4により検知できるのはマーカを含む大まかな画像内の位置(図中黄色範囲)であるが、ホーム高さ・離れ計測には各マーカの正確な位置および寸法が必要となる。そこでYOLOv4により検知された大まかな画像内の位置を利用し、デジタル画像相関法(DIC)²²⁾により各マーカの画像内の位置および寸法の精緻な推定を行った。DICはパターンマッチングの一種であり、事前に設定した対象物の参照画像と対象画像の2次元相関を指標として、画像の中から対象物の位置および寸法を推定する方法である²³⁾。ここでは、参照画像として列車前方画像に写ったホームマーカ、およびまくらぎマーカをそれぞれ設定し、各マーカの左右中心、上端および下端位置を推定した。

3.3.2 寸法換算

図7に高さ・離れ計測用の座標系を示す。前項で推定されたホームマーカ上下端および両まくらぎ上端を図7中に紫星で示す。なお、図1のようにカントを有する場合でも基本的には同じ方法で計測可能である。画像上で得られるピクセル単位の長さを実際の寸法に変換する。高さ方向は、ホームマーカ高さ $T_h=100\text{mm}$ であることを利用し、画像から推定したホームマーカ上下端の高さ方向距離により換算を行った。水平方向は長さ2mのPCまくらぎの両端内側15cm位置にまくらぎマーカ中心が一致するように設置したため、まくらぎマーカ間の距離 D_w が1700mmとなることを利用して換算を行った。さらに、マーカ施工時にホームマーカ上端から駅ホーム上端までの距離 h_0 、マーカ上端からレール上面までの距離 d_1 および d_2 を計測している。このため、これらに高さ方向の換算係数を乗じ、次項で示す画像上でのホーム高さ・離れの計算に利用した。

3.3.3 ホーム高さ・離れ計算

図7に示す幾何関係をもとに、これまでに画像内から収集した情報から、ホーム高さ・離れを推定する。まず、まくらぎマーカの左右中心上端位置から上方向に、事前に計測し、寸法換算したレール上面までの高さ(ピクセル単位)を足し、図中の点B1とB2を定める。これらの点B1とB2を通る直線KK'、直線

KK'に直角で点 A を通る直線 LL'を算出し、直線 LL'上の点 A から点 C、および直線 KK'上の点 C から軌道中心点の距離を計算したうえで、実際の寸法に換算すれば、駅ホーム高さ・離れを計算できる。なお、軌道中心点は 2 つのまくらぎマーカの間として計算することもできるが、ここではより正確にレール内側の点 D1 および D2 を推定したうえで軌道中心点を算出した。なお、レール内側は対象画像のハフ変換により抽出し、レール内側直線と直線 KK'の交点から点 D1 および D2 を算出している。

以上で説明した列車前方画像による駅ホーム高さ・離れ計測手法は、平行して開発を進める統合分析プラットフォーム¹⁰⁾の環境下で動作するプログラムとして実装予定である。本プラットフォームでは系統横断での列車前方画像の共有が可能であり、当該プログラムを実装した場合には最新の列車前方画像に対して、マーカ検知以降の処理が実施され、計測結果は統合分析プラットフォームの維持管理データの一つとして閲覧できるようにする予定である。

4. 現地試験による検証

本研究で提案した手法の有効性を検証するため、JR 四国の実路線における駅で試験施工と列車前方画像の撮影試験を実施した。対象駅は単線線区に存在する。ここでは 2 番線での結果について報告する。

4.1 地上マーカ施工と列車前方画像撮影試験

3.1 節で製作したホームおよびまくらぎマーカを実路線駅のホームおよびまくらぎに設置した。図 8 に地上マーカ施工の様子を示す。施工においてはまくらぎマーカの頂点とホームマーカの中心が同一平面上になるようレーザー墨出し器を用いて位置出しを行ったうえで実施した。図 9 に地上マーカ施工後の様子を示す。施工は昼間の間合い作業として実施したが 1 か所あたり 15 分程度であった。また、駅ホーム離れに余裕がない箇所についてはアルミ板の厚みが離れの状態を悪化させる可能性があったため、アルミ板ではなく、塗料によるペイントによりホームマーカを代替した。また、施工時にまくらぎマーカからレール上面までの高さ、ホームマーカから駅ホーム上面までの高さを計測し、それぞれ記録した。最後に駅ホーム高さ・離れの正解値と把握する目的で、図 2 に示した既存手法による駅ホーム高さ・離れ計測を実施した。

地上マーカの施工後、列車前方画像の撮影を実施した。図 10 に撮影の様子を示す。列車前方画像は鉄道総研が開発している携帯情報端末を用いた列車巡視支援アプリ (Train Patroller)⁸⁾を用いて実施した。携帯情報端末は吸盤を用いた治具により列車前方の貫通扉窓に設置した。対象列車は当該駅の 2 番線を通過す



図 8 地上マーカ施工の様子



図 9 地上マーカ施工後の様子



図10 列車前方画像の撮影

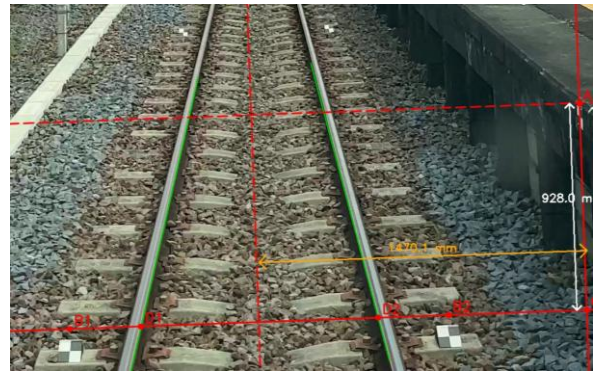
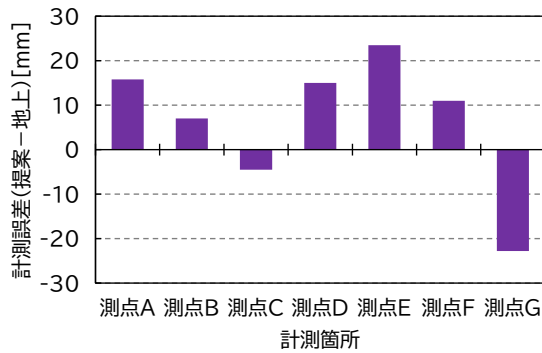
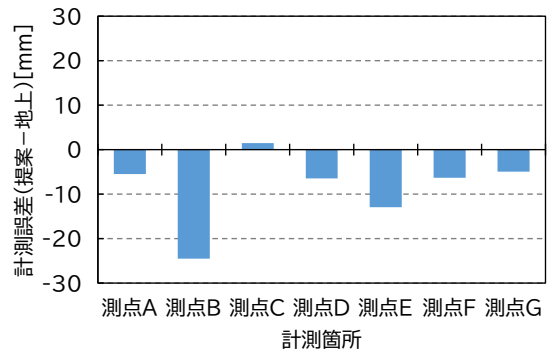


図11 駅ホーム高さ・離れ計測結果の出力例



(a) 高さ



(b) 離れ

図12 列車前方画像による駅ホーム高さ・離れの計測誤差

る特急列車とし、動画は通常の列車巡視で撮影を行う場合と同様に 30fps の Full HD で撮影した。Train Patroller の詳細は文献 8 を参照されたい。得られた列車前方画像のうち、当該駅通過部分の動画を抽出し、3章で示した提案手法を適用した。YOLOv4 によるマーカ検知の結果は図 6 を参照されたい。

4.2 ホーム高さ・離れの計測結果

図 11 に得られた列車前方画像に基づき提案手法により出力される駅ホーム高さ・離れの推計結果の出力例を示す。最終的な駅ホーム高さ・離れの推定結果だけでなく、各処理の適切性を判断できるように、処理に利用した画像内の点および直線を合わせて描画している。同図からホームマーカおよび2つのまくらぎマーカの直上にそれぞれ点 A、点 B1 および B2 が表示されており、地上マーカを正確に認識できていること、ハフ変換によりレール内側が適切に抽出されていることを確認できる。

図 12 に当該ホームの 7 箇所（測点 A～G）の高さおよび離れの計測誤差を示す。なお、計測誤差は同時に実施した地上での駅ホーム高さ・離れの計測結果との差（mm）とした。図 12 から駅ホーム離れに比べ高さの計測誤差が大きいことがわかる。駅ホーム高さは 7 箇所のうち 5 箇所ですべて誤差が 10mm 以上となっており、もっとも誤差が大きい箇所は -23mm であった。一方、駅ホーム離れは 7 箇所のうち 5 箇所ですべて誤差が 10mm 以下であった。ただし、誤差が最も大きい箇所は高さと同様の -24mm であった。なお、駅ホーム離れの計測誤差は負側で生じており、評価としては安全側となっている。以上から、提案手法による駅ホーム高さ計測については計測精度の改善が必要であるものの、駅ホーム離れ計測については多くの箇所です用上問題ない精度を有することを確認できた。以下では今後の精度改善のために、高さおよび離れのそれぞれについて計測誤差の発生要因を考察した。

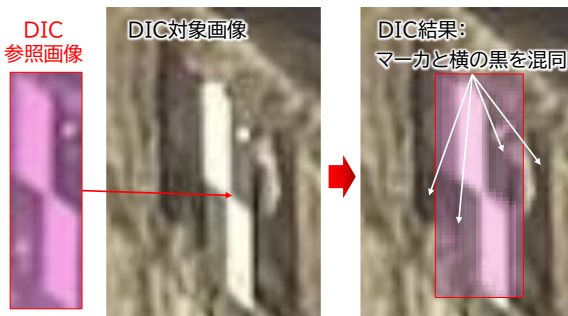


図13 ホームマーカの位置・寸法推定誤差

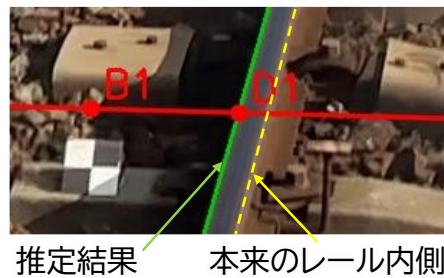


図14 レール抽出における誤差

4.3 ホーム高さ・離れの計測誤差に関する考察

以下では、駅ホーム高さ・離れの計測結果に見られた誤差の要因について、高さおよび離れについてそれぞれ考察を加え、今後の改善方針を検討した。

図13に主に高さ計測の誤差の要因と成り得るDICによるホームマーカの位置・寸法計測結果の例(測点G)を示す。測点GではDICの対象画像におけるマーカ横のホーム側面が黒くなっている。このホーム側面の黒とホームマーカにおける黒が混同され、寸法を大きく推定している。これにより寸法換算に誤差が生じ、高さ計測結果にも10mmを超える誤差が生じてしまっている。なお、寸法の推定誤差自体はホームマーカ高さ100mmに対して2mm程度とごくわずかであるが、高さ計測時に寸法換算係数として乗じるため、約1m弱のホーム高さの計測においては20mm程度の誤差となる。改善策として、ホームマーカに白色の枠を設置する、ホームマーカ周辺を合わせて着色するなどが考えられる。また、現在は前方画像からマーカ部を切り出して参照画像として用いているが、白黒の境界などをより明確化するためにより細かいピクセルで参照画像を作成し参照画像に用いることで、DIC自体の精度を向上させることも考えられる。

ホームマーカの位置・寸法推定誤差は高さ計測の精度に大きく影響するが、離れ計測誤差にはほとんど影響しない。離れ方向においては寸法換算に際して、まくらぎ両端のマーカ中心間の距離(1700mm)を用いているため、仮に各マーカで2mm程度の誤差が生じた場合でも換算係数に及ぼす誤差は0.1~0.2%程度となる。これは約1.5m程度の離れに対して1.8~3.5mm程度の誤差にしかならない。一方で測点Bでは20mmを超える誤差が生じている。この誤差について一連の処理を確認した結果、レール内側の推定に誤差が生じた場合に駅ホーム離れの計測誤差が大きくなることが判明した。

図14に離れ計測の誤差が大きい測定Bにおける左レールの推定結果を示す。本来、図中黄色点線で推定されるべきレール内側ではなく、レール外側が内側として誤って推計されてしまうことがわかる。これにより駅ホーム離れを20mm以上過少評価してしまっていることがわかる。なお、同じく離れ計測誤差が10mmを超える測点Eではレール内側ではなくレール踏面を内側として推定していることを確認している。本研究ではハフ変換による直線検出を利用してレール内側を推定しているが、今回の結果によりレールや画像の状態、影などによっては適切にレール内側を検知できない場合があることが判明した。改善策として、マーカの位置推定と同様にDICを用いる方法や複数の直線を推定する方法、複数の直線を候補として抽出したうえで最も内側の直線をレール内側として採用する方法、などが考えられる。

以上の駅ホーム高さ・離れ計測における課題については現在、改善策の試行および計測プログラムへの実装を進めている。これらの詳細については結果が整理でき次第、別紙にて論じることとしたい。

5. まとめ

本研究では、列車前方画像を用いた駅ホーム高さ・離れ計測を実現するために、画像奥行き方向の同一平面を認識するための地上マーカを用いた手法を提案した。また、列車前方画像から自動的に駅ホーム高さ・離れ計測を行うアルゴリズムを開発するとともに、実路線での検証試験を実施し、提案手法の精度や有効性、課題について整理した。実路線での検証試験の結果、駅ホーム高さは7箇所のうち5箇所で誤差が10mm以上となった。一方、駅ホーム離れは7箇所のうち5箇所で誤差が目標とした10mm以下であった。また、駅ホーム高さの計測誤差はホームマーカの位置・寸法推定の誤差に起因する一方、駅ホーム離れの計測誤差はレール内側の推定誤差に起因することを明らかにし、それぞれ改善方針を示した。

本研究では、今後の改良が必要ではあるものの、列車前方画像を用いた高精度での駅ホーム高さ・離れ計測を実現できる可能性が示されたと考える。一方で、実運用で利用していくためには本研究で検討した課題以外にもいくつかの留意事項に対応していく必要がある。まず、画像処理を用いる以上、天候などの影響は避けられないが、本研究では昼間の晴天時での試験結果のみの検証となっている。今後、様々な環境条件で試験を実施し、適用条件を明らかにしていく必要がある。同様に、今回の対象駅はほぼ直線のバラスト軌道であったが、曲線やスラブ軌道における適用性の検証も必要となる。そのほか、今回は最も厳しい条件として当該駅を通過する特急列車での試験結果のみを示したが、当該駅で停車する列車や上下方向など走行条件の違いが及ぼす影響についても確認していく必要がある。これらの課題については手法自体の高度化と並行して現在検討を進めており、今回の対象駅での継続的な試験に加え、別駅での試験による検証を予定している。

謝 辞

本研究はデジタル技術を用いた設備等のメンテナンスに関する四国旅客鉄道株式会社・公益財団法人鉄道総合技術研究所による共同研究の一環として実施されたものである。

本研究における地上マーカ製作においては株式会社鉄道用品商会 山本氏および株式会社コノエ 大橋氏に多大なご協力をいただいた。この場を借りて厚くお礼申し上げる。

文 献

- 1) 矢野貴洋, 岩本啓貴, 宇野匡和, 立花拓也, 松岡弘大: 鉄道土木系設備の保守効率化のための実態調査と課題, 鉄道工学シンポジウム論文集, Vol.28, No.1, pp.124-127, 2024
- 2) 田尾圭吾, 齋藤航, 片山雄一郎, 川口昭人, 森健矢, 田中博文, 松岡弘大: 鉄道保線系設備の保守効率化のための実態調査と展望, 鉄道工学シンポジウム論文集, Vol.28, No.1, pp.128-135, 2024
- 3) 高橋和樹, 下木健児, 三崎友樹, 蝶野武志, 為広重行, 松岡弘大: 鉄道電気系設備の保守効率化のための実態調査と展望, 鉄道工学シンポジウム論文集, Vol.28, No.1, pp.136-143, 2024
- 4) 長峯望, 鶴飼正人: 列車前方画像を用いた地上設備の設置位置検討のための視覚シミュレーション手法, 電気学会論文誌 D, Vol.136, No.2, pp.134-144, 2016
- 5) 前田梨帆, 長峯望, 合田航, 坪川洋友, 加藤爽: 列車前方画像を用いた木まくらぎ劣化度判定 AI システムの開発, 電気学会論文誌 D, Vol.144, No.3, pp.79-86, 2024
- 6) 高原恵男, 坪川洋友, 加藤爽, 長峯望, 合田航, 前田梨帆: 列車前方画像を活用した軌道部材状態評価システムの構築, AI・データサイエンス論文集, Vol.5, No.3, pp.769-777, 2024
- 7) 合田航, 糸井謙介, 長峯望, 坪川洋友: ハンディカメラによる列車前方映像からの遊間計測手法, 電気学会論文誌 D, Vol.143, No.1, pp.46-55, 2023

- 8) 田中博文, 趙博宇, 蘇迪, 長山智則: 携帯情報端末を活用した鉄道線路維持管理用の低コストな列車巡視支援方法の実用化に関する研究, AI・データサイエンス論文集, Vol.5, No.1, pp.56-65, 2024
- 9) 流王智子, 河村裕介, 羽田明生, 栗田いづみ: 分野をまたがるメンテナンスデータの統合分析プラットフォームの開発, 鉄道総研報告, Vol.36, No.8, pp.51-56, 2022
- 10) 流王智子, 河村裕介: 鉄道向け統合分析プラットフォーム, JREA, Vol.68, No.3, pp.48646-48649, 2025
- 11) カネコ: 可動式ホーム柵用走行式建築限界測定器: <https://www.kaneko-ks.co.jp/products/genkai/ks6022.html> (参照日: 2025年10月4日)
- 12) 青山正博, 中村大輔, 齊藤岳季: 新型ホーム限界測定装置の開発, JR EAST Technical Review, No.17, pp.64-67, 2006
- 13) 木村元哉, 山田裕一, 泉並良二: 光切断法を用いたホーム限界測定装置の開発, 日本機械学会第10回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集, No.03-51, pp.199-202, 2003
- 14) 向井鷹則, 栗林賢一, 秋山保行: メンテナンスDXに向けた点群データ利活用に関する開発, JR EAST Technical Review, No.67, pp.25-30, 2022
- 15) 芳賀昭弘, 榎本衛, 石塚弘道, 新井泰, 高井秀之: ホーム付近の建築限界と車両限界の変遷, 鉄道総研報告, Vol.25, No.1, pp.49-54, 2011
- 16) 影山椋, 長峯望, 向嶋宏記: カメラとLiDARセンサを統合した列車前方支障物検知手法, 鉄道総研報告, Vol.35, No.10, pp.17-22, 2021
- 17) 山本耕平, 矢尾板啓, 矢吹信喜: 2台のレール直上レーザスキャナを用いた鉄道建築限界モデル作成手法に関する研究, 土木学会論文集F3, Vol.74, No.2, I_70-I_81, 2018
- 18) 松本康寿, 平松孝晋, 上西大樹: 鉄道分野におけるMMS導入とその活用, インフラメンテナンス実践研究論文集, Vol.3, No.1, pp.235-241, 2024
- 19) 清水惇, 昆野修平, 箕浦慎太郎, 新田猛: 新幹線軌道における線路周辺画像解析エンジンを用いた建築限界確認, インフラメンテナンス実践研究論文集, Vol.3, No.1, pp.53-61, 2024
- 20) 桶谷栄一, 今西進也, 新名恭仁, 福井義弘: 単眼ステレオ視を活用した列車巡視システムの開発, 土木学会第70回年次学術講演会概要集, VI-147, pp.293-294, 2015
- 21) Bochkovskiy, A., Wang, C.-Y. and Liao, H.-Y. M.: YOLOv4: Optimal Speed and Accuracy of Object Detection, arXiv preprint, arXiv:2004.10934, 2020.
- 22) 四井陽貴, 松岡弘大, 貝戸清之: サブピクセル推定誤差発生メカニズムに着目した橋りょう変位の全視野画像計測の実用的改善法, 土木学会論文集, Vol.79, No.15, 22-1504, 2023

支承の免震化による連続 PC 桁の 地震時走行安全性と復旧性の評価

成田 顕次* 徳永 宗正* 池田 学*

Evaluation of Seismic Running Safety of Railway Rolling Stock and Restorability of Continuous PC Girder Bridges with Seismic Isolation Bearings

Kenji NARITA Munemasa TOKUNAGA Manabu IKEDA

The purpose of this paper is to clarify the running safety of railway rolling stock on continuous girder bridges with seismic isolation bearings in the traverse direction during earthquakes. Dynamic interaction analyses between vehicles and structures indicate that seismic isolation can significantly decrease derailment limit acceleration depending on the vibration frequencies of the piers and tracks. When the yield seismic intensity of the isolators is set to approximately 0.4 and the resulting dominant track frequency is reduced to 0.5 Hz or lower, derailment can be prevented even under L2-class earthquakes. Moreover, the proposed isolation system effectively suppresses track displacement and reduces pier displacement by as much as 50%.

キーワード：免震支承，地震時走行安全性，連続 PC 桁，動的相互作用解析，復旧性

1. はじめに

2004 年新潟県中越地震，2011 年東北地方太平洋沖地震，2016 年熊本地震，2022 年福島県沖地震において鉄道の脱線が発生している¹⁾。地震時に脱線を防ぐために，車両，軌道，構造物，電気，運転分野等の鉄道システム全体で多角的な地震対策を実施している²⁾。

鉄道橋りょうでは，主としてブレース補強などで橋りょう全体の剛性を高め，地震に対する耐力を向上させる耐震補強が多く用いられる³⁾。道路橋では，耐震対策以外にも，桁と橋脚の間に免震支承を導入する例も多いが⁴⁾，鉄道橋りょうで用いられた例は限定的である⁵⁾。そのため，新設の連続桁式橋りょうや耐震補強が難しい既設の河川部等の橋りょうに対する免震を含む地震対策は十分に確立されていない。この背景の一つとして，鉄道橋りょうの耐震設計は，地震時走行安全性を満足させる必要があり，剛性を高く与える設計を基本としている。これは，橋軸直角方向に振動することで車両を加振する振動変位および，図 1 に示すように，連続する構造物が位相差を持って挙動することにより構造物境界に発生する相対変位または，相対角度である不同変位が地震時走行安全性に大きく影響を及ぼすためである。

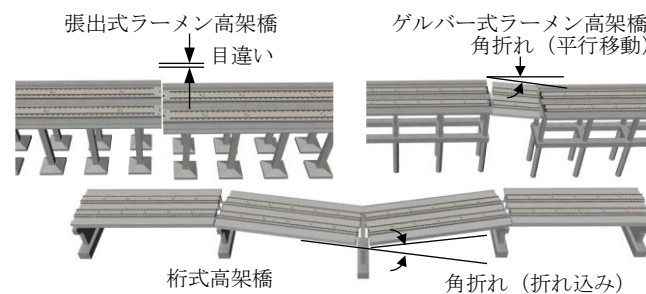


図 1 不同変位の概要

* 鉄道力学研究部 構造力学研究室

道路橋で用いられている免震構造を鉄道橋りょうに適用した場合、相対変位（不同変位）が大きくなり地震時走行安全性が低下する可能性が懸念されることから、免震構造を採用する地震対策は実務上の難易度が高い。また、支承の橋軸直角方向の免震化が地震時走行安全性に与える影響に関する研究は限られており、その影響度は明らかになっていない。

本検討では、地震対策が困難な連続桁橋りょうを対象に、橋軸直角方向に支承を免震化した場合の鉄道車両の地震時走行安全性について評価することを目的とした。まず、連続PC桁を対象に、支承の免震化および桁の曲げ変形が、軌道面上の加速度、変位、卓越振動数等の応答に及ぼす影響を把握した。さらに、連続PC桁における支承の免震化が地震時走行安全性と復旧性に与える影響について評価した。

なお、本稿は文献6の要部を抜粋して再構成したものであり、詳細については文献6を参照されたい。

2. 支承の免震化による地震時走行安全性の検討概要

支承の免震化による地震時走行安全性と復旧性を評価するため、脱線前後の車両挙動を解析可能な、新幹線車両と鉄道構造物との動的相互作用解析プログラム DIASTARS III⁷⁾を用いた。車両の力学モデル、脱線前の車輪/レールの力学モデルについては、文献7を参照されたい。

鉄道構造物は一般的に標準設計が適用され、その動的挙動は1自由度系モデルで表現できることが多い⁸⁾。実設計でも、1自由度系に基づく非線形スペクトル法により、地震時応答を推定するのが一般的である。一方、本研究では支承・橋脚の非線形性と桁の曲げ変形を同時に考慮するため、支承および橋脚に非線形ばねを与える2自由度系でモデル化した。橋脚はトリリニア型の骨格曲線、標準型の履歴特性を持ち、支承はバイリニア型の骨格曲線、標準型の履歴特性を与えた。減衰は、モデルの各モードに対して5%のモード減衰比を与えた。地震動の入力方向は橋軸直角方向（以下、「水平方向」と示す）とした。

図2に、対象とする連続桁式橋りょうの解析モデルを示す。検討モデルは橋脚-支承-桁で構成し、桁の曲げ変形および構造物間の不同変位を考慮できるモデルである。橋脚と支承に非線形ばねを配置し、桁は弾性梁要素とし曲げ剛性を与えた。なお、免震機構の一例として滑り支承を用いた。

表1に、桁の諸条件、橋脚、支承の振動諸元に関する検討ケースを示す。対象とした橋りょうは橋長400mの5径間連続PC桁である。桁のコンクリートの弾性係数は31 kN/mm²、断面二次モーメント I_z は90 m⁴と

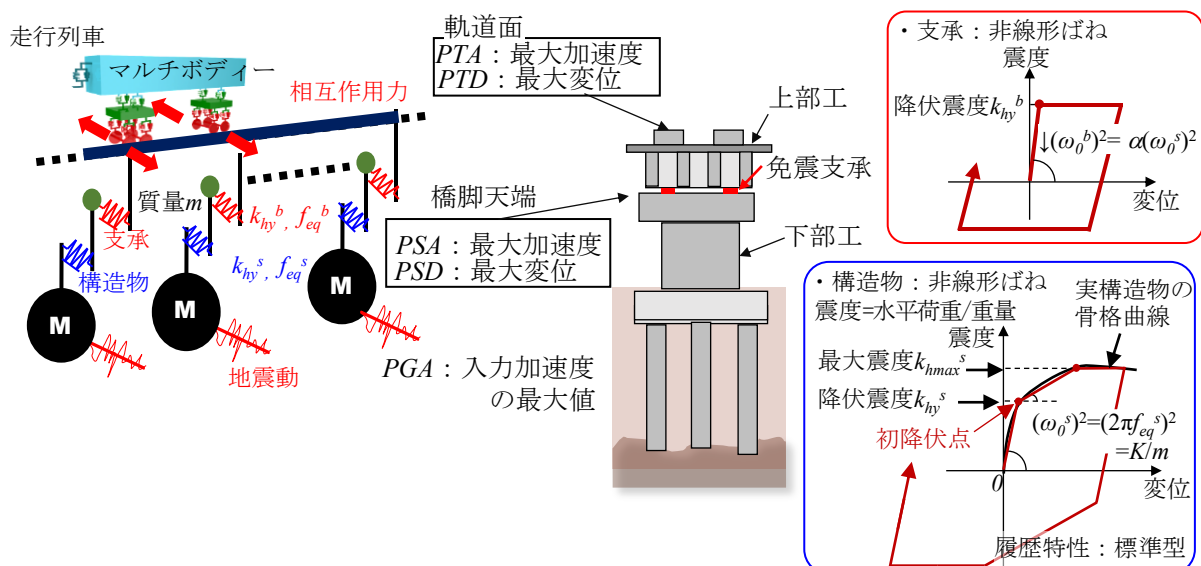


図2 連続桁式橋りょうの解析モデル

表 1 振動諸元に関する検討ケース⁹⁾

桁		橋脚		支承	
橋長	桁の固有振動数 中央部／側径間部	降伏震度 k_{hy}^b	固有振動数 f_{eq}^s	降伏震度 k_{hy}^b	支承剛性比 $\kappa (=K^b / K^s)$
400m(59+94×3+59)	1.71Hz／4.33Hz	0.5	0.5, 0.7, 1.0, 2.0Hz	0.3, 0.4, 1000	0.3, 1.2, 2.6, 1000

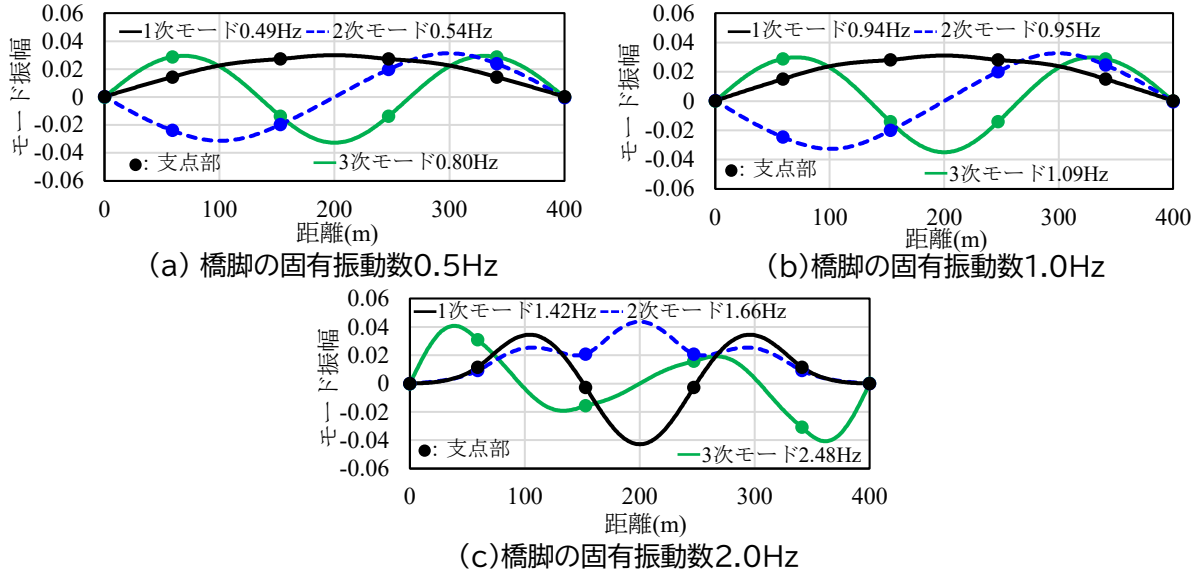


図 3 固有振動数と振動モード形状の関係

した。一般的な連続桁の諸元に関する既往調査⁹⁾に基づき、桁の自重は固定死荷重、付加死荷重を合わせて 446.69 kN/m とした。表中に示す桁の固有振動数は、1 スパンを単純梁と仮定し、最大スパン長から面外曲げ 1 次の固有振動数を算出した値である。橋脚、支承の振動諸元に関する検討ケースは、実際の線区における鉄道橋の固有振動数と降伏震度の統計調査結果¹⁰⁾を踏まえて設定した。橋脚の固有振動数は、橋脚が前後の桁の質量の半分を負担すると仮定して、橋脚の固有振動数 f_{eq}^s が 0.5, 0.7, 1.0, 2.0 Hz となるように橋脚の 1 次剛性を設定した。なお、橋脚単体での質量は桁の質量に対して 0.15 倍程度となるように与えた。橋脚の降伏震度は、統計調査の結果における最頻値である 0.5 とした¹⁰⁾。

免震支承の特性として、橋脚と支承の剛性比、降伏震度に着目した。支承の剛性比が地震時走行安全性に与える影響を把握するため、支承剛性比 $\kappa (=K^b / K^s, K^b$: 支承の 1 次剛性, K^s : 橋脚の 1 次剛性) を 0.3, 1.2, 2.6 とした。支承の降伏震度 k_{hy}^b は桁の加速度を積極的に低減する設計を想定し、橋脚の降伏震度よりも低い 0.3, 0.4 とした。また、比較対象として剛性が十分大きい支承 (以下、「剛支承」と示す。) の条件も設定した ($\kappa=1000, k_{hy}^b=1000$)。

入力地震動は鉄道設計標準の設計地震動 G4 地盤用の L1 地震動 (以下、「L1(G4)と示す。’)を用いた⁸⁾。その時の加振振幅は 0.5 m/s² 刻みで段階的に増加させた。なお、基準とする L1(G4)の最大加速度は約 1.9 m/s² である。

3. 支承の免震化が橋りょうの地震時応答特性に及ぼす影響

3.1 固有値解析結果

図 3 に、表 1 の 5 径間連続 PC 桁を対象に固有値解析によって得られた、水平方向の 1~3 次の固有振動

数とモード形状を示す。図 3 は、橋脚の固有振動数 $f_{eq}^s=0.5, 1.0, 2.0$ Hz の結果である。図 3(a), (b) の $f_{eq}^s=0.5, 1.0$ Hz の場合、1 次モードの固有振動数は、橋脚の f_{eq}^s に近い値であることがわかる。また、2 次モード、3 次モードは、その形状から刺激係数が小さく、1 方向载荷となる地震動に対して励起されにくいと考えられる。図 3(c) の $f_{eq}^s=2.0$ Hz の場合、1 次モードの固有振動数が 1.42 Hz で、単純梁から算出した桁の固有振動数よりも若干低い値を示す。また、1 次、3 次モードは、刺激係数が小さく、地震動に対しては 2 次モードが支配的となる。図 3(a), (b) では、橋脚の変形が主要となるモードであるのに対し、図 3(c) では、橋脚の変形に加え、桁の曲げ変形が現れていることがわかる。桁の固有振動数が橋脚の固有振動数よりも低い場合、地震時に卓越する 1 次モードに桁の各径間が変形する形状が表れると考えられる。

支承の免震化が軌道面の加速度、橋脚の変位に及ぼす影響を評価するため、剛支承、免震支承の場合の地震時の軌道面の応答加速度、変位、橋脚天端の変位を比較した。なお、橋脚 $f_{eq}^s=0.5$ Hz, 1.0 Hz の 1 次モードの形状が類似していることから、応答値の評価対象は橋脚 $f_{eq}^s=0.5$ Hz, 橋脚 $f_{eq}^s=2.0$ Hz を対象とした。

3.2 軌道面の加速度に与える影響

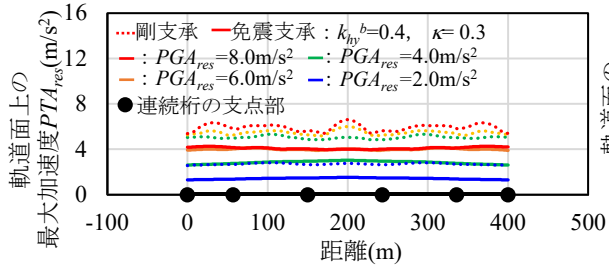
図 4 に、5 径間連続 PC 桁を対象に、橋脚の固有振動数 f_{eq}^s における、入力加速度の最大値 PGA_{res} に対する軌道面の最大加速度 PTA_{res} の分布を示す。図には剛支承（破線）、免震支承（実線）の結果を示す。図 4(a) は橋脚 $f_{eq}^s=0.5$ Hz, (b) は橋脚 $f_{eq}^s=2.0$ Hz の結果である。

図の剛支承（破線）時の結果から、入力加速度の最大値 PGA_{res} の増加と共に軌道面の加速度 PTA_{res} も増加する。特に支点部（黒丸位置）に比べてスパン中央部で軌道面の加速度が大きくなる傾向があり、支点間の水平方向の曲げ振動が影響していると考えられる。図 4(b) の橋脚の固有振動数 $f_{eq}^s=2.0$ Hz, 入力加速度の最大値が 8.0 m/s^2 （赤破線）の場合、支点部（黒丸位置）に比べてスパン中央部で軌道面の加速度が 5 m/s^2 から 15 m/s^2 に 3 倍程度増加する。一方で、図 4(a) の橋脚の固有振動数 $f_{eq}^s=0.5$ Hz の場合、スパン中央部での加速度は支点部に比べて 1.2 倍程度にしか増加しない。この時の桁の固有振動数は 1.7 Hz である。これは、橋脚より桁の固有振動数が高い場合は、桁の変形を励起する成分が伝達されない一方で、橋脚より桁の固有振動数が低い場合は、桁の面外曲げ変形が共振的に励起されるためであると考えられる。

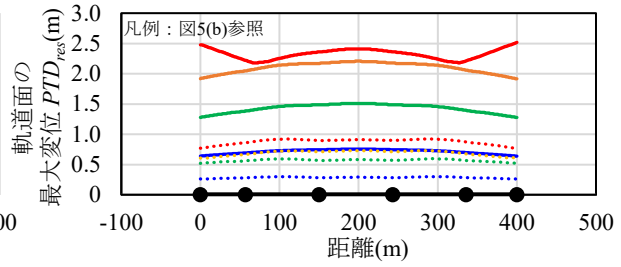
一方、免震支承時（実線）の軌道面の加速度の結果に着目すると、剛支承（破線）に比べて、軌道面の加速度が大幅に低下している。図 4 (b) に着目すると、剛支承の場合、200 m 付近のスパン中央では軌道面の加速度は最大で 15 m/s^2 あったものの、支承の免震化により 0.5 倍程度に低下した。

3.3 軌道面の変位に与える影響

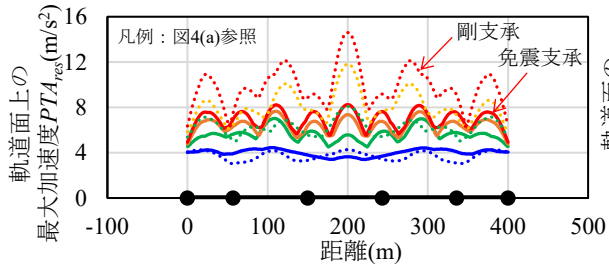
図 5 に、入力加速度の最大値 PGA_{res} に対する軌道面の応答変位の最大値 PTD_{res} を示す。図 5(a), (b) は、橋脚の固有振動数 $f_{eq}^s=0.5, 2.0$ Hz の結果で、図には剛支承（破線）、免震支承（実線）の結果を示す。なお、軌道面の応答変位は入力地震動の変位成分を含まない、橋脚下端からの相対変位を示す。橋脚の f_{eq}^s が 0.5 Hz, PGA_{res} が 2.0 m/s^2 の場合、剛支承（青破線）では PTD_{res} は 0.25 m であったが、免震支承（青実線）では PTD_{res} は 0.7 m 程度に増加し、 PGA_{res} が 8.0 m/s^2 の場合、剛支承（赤破線）では PTD_{res} は 0.9 m で、免震支承（赤実線）では PTD_{res} は 2.5 m と約 3 倍程度に増加した。橋脚の f_{eq}^s が 2.0 Hz, PGA_{res} が 2.0 m/s^2 の場合、剛支承では、 PTD_{res} は 0.1 m で、免震支承では、 PTD_{res} は 0.3 m に、 PGA_{res} が 8.0 m/s^2 の場合、 PTD_{res} は 0.2 m であったが、免震支承では、 PTD_{res} は 0.5 m と約 3 倍程度に増加した。これらの図から、橋脚の固有振動数が違う場合でも、支承の免震化に伴う PTD_{res} の増加率は大きく変わらないことがわかる。また、スパン中央部と支点部の軌道面の変位に大きな違いがないことから、水平方向における面外変形の影響は小さいことがわかる。



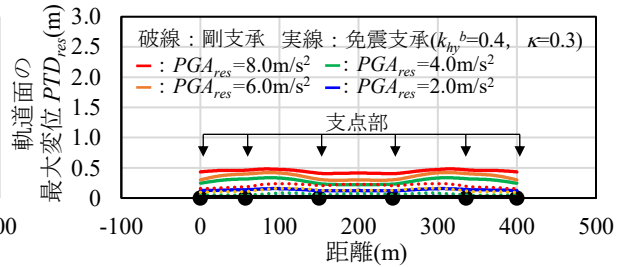
(a) 橋脚の固有振動数0.5Hz



(a) 橋脚の固有振動数0.5Hz



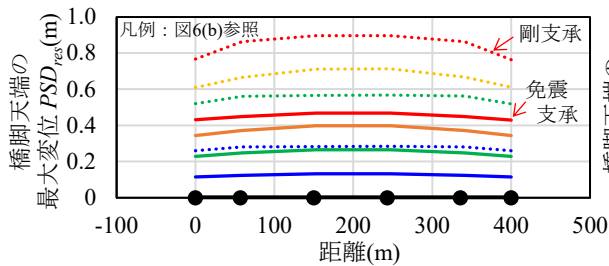
(b) 橋脚の固有振動数2.0Hz



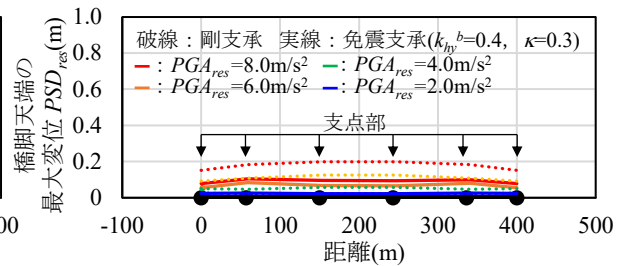
(b) 橋脚の固有振動数2.0Hz

図4 入力加速度と軌道面の加速度の関係

図5 入力加速度と軌道面の変位の関係



(a) 橋脚の固有振動数0.5Hz



(b) 橋脚の固有振動数2.0Hz

図6 入力加速度と橋脚天端の変位の関係

3.4 橋脚天端の変位に与える影響

図6に、入力加速度の最大値 PGA_{res} に対する橋脚天端の最大変位 PSD_{res} を示す。剛支承(破線)の結果に着目すると、橋脚の固有振動数 f_{eq} が低い方が PSD_{res} は大きい傾向にある。一方、免震支承の結果に着目すると、橋脚の固有振動数 f_{eq} が低い方が PSD_{res} は大きい傾向にあるが、剛支承時に比べて、 PSD_{res} は大幅に小さい値を示す。図6(a)の免震支承時の橋脚の $f_{eq}=0.5$ Hz、入力加速度が 8.0 m/s^2 (赤実線)の場合、軌道面の変位は 0.5 m 程度であり、剛支承時(赤破線)に比べて 0.5 倍程度に低下しており、支承の免震化の効果が表れていると推察される。支承の散逸エネルギーと構造物の振動エネルギーの関係まで厳密に評価はしていないが、橋脚天端変位の低下は、免震支承による長周期化に伴う慣性力の低減とエネルギー吸収といった免震化の効果による影響が大きいと考えられる。

4. 支承の免震化が橋りょうの地震時走行安全性に及ぼす影響

支承の免震化が地震時走行安全性に及ぼす影響を検討するにあたり、脱線時の入力加速度の最大値 PGA_{lim} (以下、脱線限界入力加速度)を指標に橋脚、支承の性能が地震時走行安全性に及ぼす影響を分析した。なお、脱線限界入力加速度とは、入力加速度の振幅を段階的に増加させて解析した際、いずれかの車両が脱線した時点の入力地震動における最大加速度である。解析では、列車の走行開始位置を7箇所設定し、

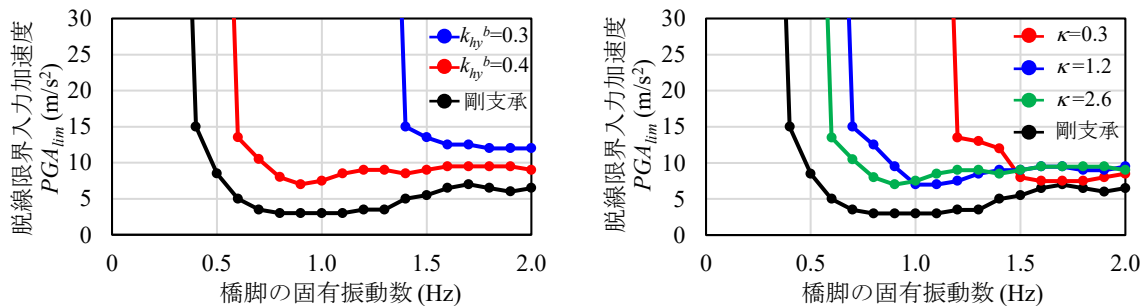
それぞれについて脱線限界入力加速度を算出し、その中の最小値とした。

図 7 に、橋脚の固有振動数 f_{eq}^s と脱線限界入力加速度 PGA_{lim} の関係を示す。図 7(a) は、橋脚の剛性に対する支承剛性比 $\kappa=2.6$ の場合の結果であるが、剛支承に比べて免震支承は、入力加速度が増加しても軌道面の加速度は増幅しにくいため、 PGA_{lim} が増加したと考えられる。 $k_{hy}^b=0.4$ の場合、剛支承と比べ、脱線限界入力加速度 PGA_{lim} は全体的に向上する。 PGA_{lim} は橋脚の f_{eq}^s が $0.4\sim 0.7$ Hz の範囲では著しく向上し、車両の固有振動数に近い $0.8\sim 1.3$ Hz の範囲では地震時走行安全性が 2 倍程度向上する。降伏震度の違いに着目すると、 k_{hy}^b が低いほど、脱線限界入力加速度 PGA_{lim} の向上が顕著であるが、橋脚の固有振動数が 1.5 Hz より高い領域では、免震支承の降伏震度が低い場合でも、免震化により軌道面の振動数が車両の固有振動数 1.0 Hz 付近に近づくため、 PGA_{lim} を大幅に向上させることは難しいと考えられる。

図 7(b) は、支承の降伏震度 $k_{hy}^b=0.4$ の場合の支承剛性比 κ を変化させた結果を示す。図から、剛支承に比べて免震支承時の脱線限界入力加速度 PGA_{lim} は高い傾向を示す。図の支承剛性比 $\kappa=1.2$ の場合、 $\kappa=2.6$ の場合に比べて、橋脚の固有振動数が $0.5\sim 1.0$ Hz の範囲で PGA_{lim} は 1.5 倍程度に向上するが、 1.0 Hz 以上の範囲で PGA_{lim} は同等の値であった。また $\kappa=0.3$ の場合、橋脚の f_{eq}^s が $0.5\sim 1.5$ Hz の範囲で大幅に向上した。

図 8 に、軌道面の卓越振動数と脱線限界入力加速度 PGA_{lim} の関係を示す。橋脚の固有振動数は表 1 に示すように $f_{eq}^s=0.5, 0.7, 1.0, 2.0$ Hz である。図 7 から軌道面の卓越振動数が車両の固有振動数 1.0 Hz に近い場合、 PGA_{lim} は向上しにくいため、支承剛性比が軌道面の卓越振動数に及ぼす影響を検討した。なお、軌道面の卓越振動数は、軌道面の最大加速度、最大変位から正弦波応答を仮定して推定した¹¹⁾。図に示す白抜きのプロットは、 PGA_{lim} が 9 m/s^2 の場合でも走行車両において脱線が発生しなかったケースである。

図から、免震支承を用いた場合、支承剛性比 κ の低下と共に、軌道面の卓越振動数は低下する。軌道面の卓越振動数 f_{eq}^t が 0.5 Hz 以下の場合と $f_{eq}^t=1.0$ Hz の場合を比較すると脱線限界入力加速度 PGA_{lim} は 4 倍以上に向上した。一方、免震化に伴い軌道面の卓越振動数が車両の固有振動数に近い 1.0 Hz 付近に低下する場



(a) 支承の降伏震度が脱線限界入力加速度に与える影響 ($\kappa=2.6$) (b) 支承剛性比が脱線限界入力加速度に与える影響 ($k_{hy}^b=0.4$)

図 7 支承性能が脱線限界入力加速度に与える影響

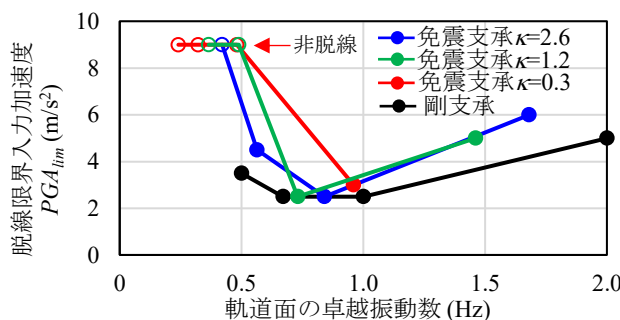


図 8 軌道面の卓越振動数が脱線限界入力加速度に与える影響

合、 PGA_{lim} の向上はみられない。支承剛性比 $\kappa=2.6$ の場合の結果に着目すると、軌道面の卓越振動数が1.0 Hz 以上では、免震支承を用いても、軌道面の卓越振動数 f_{eq}^t は大幅に低下しないため、 PGA_{lim} は剛支承時と同程度である。

橋脚の固有振動数、軌道面の卓越振動数と脱線限界入力加速度 PGA_{lim} の関係から、支承の免震化は橋脚の固有振動数 f_{eq}^s が1.0Hz 以下の場合に有効であり、支承を低降伏震度、低剛性、即ち軌道面の加速度応答を低減、長周期化させ、軌道面の卓越振動数 f_{eq}^t を0.5Hz 以下にすることで、脱線限界入力加速度 PGA_{lim} が著しく向上する、すなわち地震時走行安全性が向上する傾向にあることが明らかとなった。

5. 支承の免震化が地震時走行安全性と復旧性に及ぼす影響

支承の免震化により軌道面の加速度、橋脚天端の変位の低減、地震時走行安全性の向上が可能であることから、支承の免震化が地震時走行安全性と復旧性に及ぼす影響について検討した。なお、支承の降伏震度 k_{hy}^b は、L1 地震時に弾性挙動、L1 地震時以上で支承が免震化し、桁の加速度を積極的に低減する設計を想定して、0.4とした。

図9に、L2 地震動相当の入力加速度における桁の支点部、スパン中央における最大応答変位 PTD_{res} 、橋脚天端の最大応答変位 PSD_{res} と脱線限界入力加速度 PGA_{lim} の関係を示す。脱線限界入力加速度 PGA_{lim} は、地震時走行安全性の評価に用い、前章と同様に入力加速度の振幅を段階的に増加させて解析した際、いずれかの車両が脱線した時点の入力地震動における最大加速度である。桁、橋脚天端の最大応答変位 PTD_{res} 、 PSD_{res} は、復旧性の評価に用い、橋脚の応答変位と損傷の程度に高い相関があることから、L2 地震動相当時（入力加速度 8.0 m/s^2 相当）における最大応答変位である。

図から、剛支承の結果に着目すると、橋脚の f_{eq}^s が低いほど、 PTD_{res} 、 PSD_{res} が大きくなり、 $f_{eq}^s=0.5 \text{ Hz}$ の場合、 PTD_{res} 、 PSD_{res} で1.0 m程度の変位が生じている。また、 PTD_{res} と PSD_{res} では、大きな差は確認できない。

図9(a)~(c)の免震支承の結果に着目すると、図の支承剛性比 κ が2.6で橋脚の f_{eq}^s が0.5 Hzの時、 PTD_{res} （スパン中央）は1.2 m程度であり、剛支承時（ $f_{eq}^s=0.5 \text{ Hz}$ ）の PTD_{res} （スパン中央）と大きく変わらない。

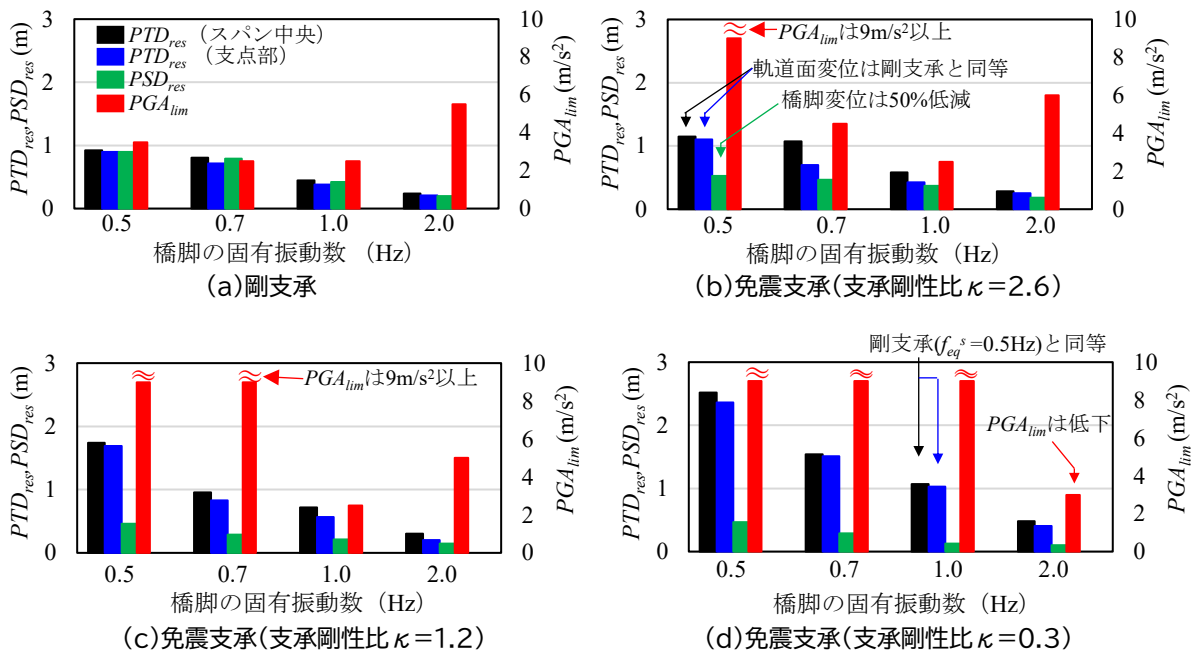


図9 軌道面の最大変位、橋脚天端の最大変位と脱線限界入力加速度の関係

また、スパン中央と支点部の PTD_{res} は大きな差がない傾向を示す。この時の PGA_{lim} は 9.0 m/s^2 以上であることから、支承が免震化しても桁の変位を顕著に発生させずに、脱線限界入力加速度 PGA_{lim} が向上している。また、 PSD_{res} に着目すると、0.5 倍程度になっていることから、橋脚の復旧性も向上している。

支承剛性比 κ が 0.3、橋脚の f_{eq}^s が 2.0 Hz の結果に着目すると、 PGA_{lim} は剛支承時に比べて低下している。これは、軌道面の卓越振動数が車両の固有振動数 1.0 Hz 付近に低下するためである。橋脚の f_{eq}^s が 1.0 Hz の結果に着目すると、最大変位は桁のスパン中央で 1.0 m 程度であり、剛支承時の橋脚の f_{eq}^s が 0.5 Hz と同程度の結果である。また、 PSD_{res} は剛支承時に比べて 0.5 倍程度に低下している。 PGA_{lim} は、剛支承時では 2.5 m/s^2 である一方で、免震支承の場合は 9.0 m/s^2 以上、即ち 4 倍以上に向上している。一方で、橋脚の f_{eq}^s が 0.5 Hz の時のスパン中央と支点部の PTD_{res} の結果に着目すると、剛支承の結果に比べて 2.5 倍程度増加している。支点部の PTD_{res} が大幅に増加すると支承の移動限界を超過、または落橋する可能性が考えられるため、支承の移動可能量や残留変位に対する確認、落橋防止工を設置するなどの配慮が必要である。

以上のことから、適切な支承剛性比を有する免震支承を導入することで、軌道面の変位を剛支承時と同程度に留めながら、橋脚の変位を最大で 50% 程度に低減し、かつ脱線限界入力加速度 PGA_{lim} を 4 倍以上に増加させ、地震時走行安全性が向上する条件を見出した。この条件下においては、L2 地震動相当の入力加速度に対しても走行安全性を確保し、復旧性も向上させることが可能である。

6. まとめ

本研究では、連続 PC 桁を対象に、橋軸直角方向に支承を免震化した場合の鉄道車両の地震時走行安全性と復旧性について検討した結果、以下の結論を得た。

- (1) 車両と橋りょうの動的相互作用解析の結果、桁の固有振動数が橋脚の固有振動数より高い場合には、桁の変形を励起する成分が伝達されにくく、スパン中央部で軌道面加速度の増加は確認されなかった。一方、橋脚の水平方向の固有振動数が桁の水平曲げ振動モードの固有振動数より高い場合には、桁の水平曲げ振動が卓越し、軌道面加速度が約 3 倍に増加する。また、支承を免震化した場合には、この増加を約 1.5 倍に抑制できることを確認した。
- (2) 橋脚の固有振動数、軌道面の卓越振動数と脱線限界入力加速度の関係から、支承の免震化は橋脚の固有振動数が 1.0 Hz 以下の場合に有効であり、支承を低降伏震度、低剛性、即ち軌道面の加速度応答を低減、長周期化させ、軌道面の卓越振動数を 0.5 Hz 以下にすることで、脱線限界入力加速度が 4 倍以上に向上する。
- (3) 支承の免震化が地震時走行安全性と復旧性に及ぼす影響について検討した結果、免震支承の降伏震度を 0.4 とし、橋脚の固有振動数が 1.0 Hz 以下かつ軌道面の卓越振動数が 0.5 Hz 以下となるよう支承特性を制御することで、剛支承と比較して、軌道面の水平変位が顕著に増加せず、橋脚天端の水平変位が 50% 程度に低減され、本検討の範囲においては L2 級の地震動に対しても脱線に至らない。

なお、本研究の免震化においては、隣接橋りょうとの境界部で目違いが生じないことを前提としているため、目違い対策として、目違い防止工²⁾などが必要である事に留意されたい。

文 献

- 1) 鉄道の地震時走行安全研究会：鉄道の地震時走行安全，鉄道工学シンポジウム論文集，No.16，pp.141-148，2012
- 2) 重村綾子，西川文人：新幹線の地震対策に関する検討会中間とりまとめ（2022 年 12 月 14 日），JREA，Vol.66，No.6，pp.47030-47033，2023

- 3) 吉田幸司, 松田猛, 阿知波秀彦, 関雅樹: 高架橋のダンパーブレース補強による東海道新幹線の脱線・逸脱防止対策, J-Rail2009, pp.663-666, 2009
- 4) 道路橋の免震構造研究委員会: 我が国の免震橋事例集, 土木研究センター, 2015
- 5) 徳永宗正, 古屋卓稔, 豊岡亮洋, 岡本大, 曾我部正道, 室野剛隆, 中田裕喜, 宇野匡和: 鉄道長大橋りょうの支承免震化を考慮した地震時列車走行性解析, 第 71 回土木学会年次講演会, I-236, pp.471-472, 2016
- 6) 成田顕次, 徳永宗正, 池田学: 支承の橋軸直角方向の免震化による連続 PC 桁の地震時走行安全性の検討, 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol.77, No.2, pp.I_551-I_562, 2021
- 7) 松本信之, 田辺誠, 涌井一, 曾我部正道: 非線形応答を考慮した鉄道車両と構造物との連成応答解析法に関する研究, 土木学会論文集 (A 編), Vol. 63, No. 3, pp. 533-551, 2007
- 8) 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
- 9) 成田顕次, 徳永宗正, 池田学: 連続桁の地震時走行安全性の基本特性, 鉄道工学シンポジウム論文集, No.25, pp.199-206, 2021.
- 10) 成田顕次, 徳永宗正, 曾我部正道: 鉄道高架橋の地震時非線形連成挙動を考慮した不同変位の推定手法, 鉄道工学シンポジウム論文集, No.23, pp.163-170, 2021
- 11) 成田顕次, 徳永宗正, 池田学: 降伏震度が異なる RC 橋りょう境界部の地震時相対変位の推定手法, コンクリート工学年次論文集, Vol.42, No.2, pp.667-672, 2020

鉄道総研報告
RTRI REPORT

鉄道運転士の聴力検査に用いるささやき声の音圧・周波数特性

星野 慧* 倉友 乃康* 上田 珠生*
鈴木 浩明** 山本 尚寿***

Sound Pressure and Frequency Characteristics of Whispered Voices Used in Hearing Tests for Railway Drivers

Kei HOSHINO Noko KURATOMO Tamaki UEDA
Hiroaki SUZUKI Naotoshi YAMAMOTO

In order to obtain a railway driver's license, drivers have to pass a physical examination. The hearing standard in the physical examination states that "each ear must be able to hear whispered words clearly at a distance of 5 meters", but the specific method of measurement is not clear, nor its relevance to the audiometer test method used by JR. A survey was conducted to understand the characteristics of whispered voices across different phrases and speakers. The results confirmed that, regardless of the phrase or speaker, the peak sound pressure generally occurred around 1000 Hz. Although the overall sound pressure level depended on background noise levels, these findings were consistent with trends observed in previous measurements conducted by railway companies.

キーワード：人間工学，運転士，聴力，ささやき声

1. 聴力基準に関する実態調査の結果と課題

「動力車操縦者運転免許に関する省令」第八条の2（身体検査）及び別表二は、運転士（動力車を操縦する係員）に求められる身体機能，対応する身体検査項目とその基準を規定している。動力車操縦者運転免許（以下、「運転免許」）を取得するには、同身体検査に合格する必要がある。運転免許取得後においても「鉄道に関する技術上の基準を定める省令」第十条（係員の教育及び訓練等）第二項の規定などに基づき、年1回以上の身体検査を受け、業務に支障ないことの確認が求められている。「聴力」については、「各耳とも5m以上の距離でささやく言葉を明らかに聴取できること。」とされている。（以下、「ささやき声方式」の検査と呼ぶ）。

一方、旧国鉄は純音の周波数や大きさを変化させて出力できるオーディオメータを用いた聴力基準判定方式の確立を目指した検討を1950年代後半から進めてきた。幾度かの改訂を経て、1982年（昭和57年）には聴力レベルを単位として、1000Hzで40dB、4000Hzで65dBの音を聴取できることという判定基準を策定した。国鉄の分割民営化後は、国鉄を承継したJR各社における身体検査基準となり、現在に至っている（以下、「オーディオメータ方式」の検査と呼ぶ）¹⁾。

上述のように、我が国の鉄道では2種の異なる方式で聴力検査が実施されているが、両者の関係は明確ではない。このため、「動力車操縦者の身体検査に関する調査検討会（事務局：日本鉄道運転協会、以下「調査検討会」と略）」において、2021年度以降、聴力基準のあり方についての具体的な調査検討を進めてきた。その一環として、2023年までに、ささやき声方式で検査を実施している鉄道事業者の協力を得て、検

* 人間科学研究部 人間工学研究室

** 人間科学研究部

*** 東日本旅客鉄道株式会社

表1 検査方法について

項目	詳細
検査場所	静かな部屋または以下に準じた環境で行う。 ・部屋の窓及び扉は閉め、検査に支障するような大きな音を発する空調や換気扇は、検査時は動作させない ・列車走行音などが発生する環境では、静かなタイミングで検査を実施する
検査位置	受診者は検査者から5mの間隔をあけて、互いに立位または座位で、正対する
受診者の体勢	検査しない方の耳を指やイヤーマフなどの専用器具でふさいで、両目を閉じる。
検査者の体勢	うつむかず、まっすぐ前を向き、記録用紙などで顔の前を遮らない。
検査方法	検査者は「ささやき声(声帯を振動させずに発する無声音)」を受診者が聴取できるか確認する。 ①聴取の可否や生年月日などの質問をする。受診者は、検査者に対して挙手や口頭で回答する。 ②検査者は駅名などの検査用語を受診者にささやき、受診者は検査用語を復唱する。
判定方法	受診者が5問中3問以上正確に回答または復唱できることを確認することを標準とする。
検査時の留意点	検査者は、受診者が検査者の発声動作に気づかないよう、両目が閉じていることを確認する。なお、受診者を閉眼させずに、補助者が受診者の視線を遮る程度のボードなどを用いる方法も可能とする。

査の実施方法や検査に用いるささやき声の詳細(周波数分布と音圧)を把握するための調査を実施した²⁾。調査の結果、無声音によるささやき声は1000Hz付近にピークを持ち、その帯域のA特性音圧レベルは概ね30~40dBで、オーディオメータ方式の1000Hz、40dBという基準と概ね一致することを確認した³⁾。

これを受け、実際に鉄道事業者が実施していた検査方式²⁾と、ささやき声による検査の手引き⁴⁾などを参考に、検査場所・検査時の検査者と受診者の位置関係・検査者と受診者の体勢や使用する備品・そのほかの注意点を整理したのが表1である。

ただし、具体的な「検査方法」は事業者ごとに異なっているため、調査検討会では標準的な検査方法を示すことにした。例えば、声帯を振動させない無声音を用いる事業者と、声帯を振動させる有声音の事業者が混在し、検査に用いる文言も事業者ごとに様々であるため、2024年度に追加の調査を実施することとなった。様々な文言の音圧や周波数分布を調べ、検査に適した文言案を選定することが調査の目的である。なお、有声音に比べて、無声音は音圧や周波数帯域の性差・個人差が少ないことから、標準的な検査で用いるささやき声は無声音を推奨するものとした。本論文では、国からの委託を受けて実施した調査の概要を報告する。

その後、調査検討会での審議を経て、2025年3月にささやき声方式の標準的な検査方法が示され⁵⁾、2026年3月に改訂された「動力車操縦者身体検査マニュアル」に、「附録8-1 会話法の検査方法等の例」として明文化された⁶⁾。

2. 調査方法

2.1 対象

男女10名(平均年齢41.3歳、標準偏差8.58歳、男性6名・女性4名)が参加した。参加者は聴力検査における検査者役として、ささやき声を発声した。

2.2 測定方法

測定は、表 1 に示した検査場所の条件を満たす静かな部屋で行った。部屋は道路に面していない施設の中の敷地の中央にあり、窓や空調設備のある一般的な会議室（縦 8.5m, 横 3.9m）であった。測定時には、窓を閉め、空調を使用しない状態で、廊下を通る通行人による影響も少なく、会議室内に騒音がない静かな状況で計測した。また、表 1 に示した検査位置に従い、検査者と受診者は立位姿勢で 5m 離れて正対している状況とし、検査者の立位位置から 5m 離れた場所の床から 1.5m を受診者の耳位置の高さと仮定して騒音計を設置して音声を測定した。計測に用いた騒音計は、精密騒音計（RION NL-52, 波形収録：NX42-WR, サンプリング周波数 48kHz, ビット長 24bit）であり、三脚に固定し、音圧波形を収録した。図 1 に計測の様子を示す。

表 2 には、測定に使用した 6 種類の文言を示す。文言は、3 種類の単語と、3 種類の単文の合計 6 種類であり、単文は現場でのささやき声の聴取時に使用されていた 3 種類を選定した²⁾。単語の 3 種類は、聴取しやすい言葉と聴取しにくい言葉のどちらも含まれるようにし、また、3 拍以下の単語の場合は聞き間違いが生じやすいと予想されたことから、4 拍以上を含む単語として、馴染みのある誰にでもわかりやすい単語を選定した。聴取しやすい単語としては「カ・サ・タ行」を多く含む良聴語の中から「トウキョウ」を選定した。また、聴取しにくい言葉として「ナ・マ・ラ・ハ行」を多く含む難聴語の中から「フジノヤマ」と「ミナミノハヤ」を選定した⁴⁾。

6 種類の文言について参加者が説明を受けたあとに、参加者は検査者位置に立った。ささやく発声をする際には、5m 前方に設置された騒音計の位置にいる実験者にささやき声が聞こえるような発声となるように指示された。参加者は実際にささやく練習を一度行い、有声音になっていないことを確認した後に、本番の無声音でのささやき声の発声を行った。ささやき声は 2 回ずつ計測し、より騒音のない状況での発声時を解析対象とした。暗騒音はささやき声の発声前の 10 秒間を収録し、対数平均を用いた平均値を算出した。解析対象の音圧波形に対して、A 特性の周波数重み付けをした後、1/3 オクターブバンド毎の音圧レベルに変換した。

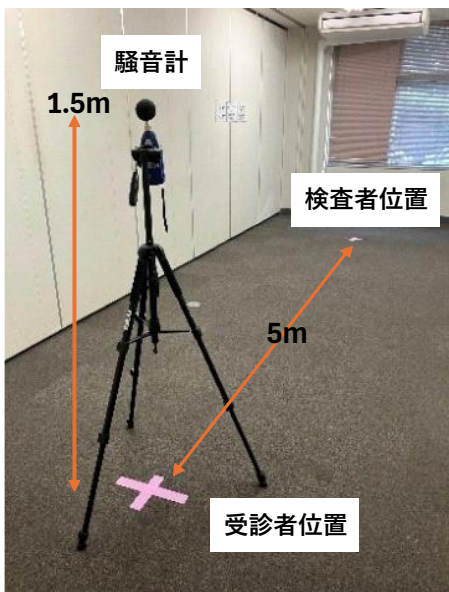


図 1 計測時の様子

表 2 測定に使用した 6 種類の文言

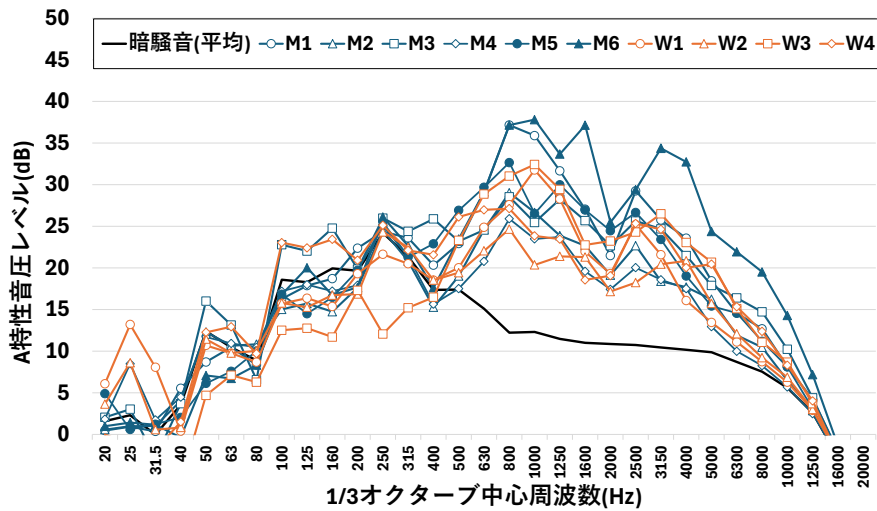
項目	内容	備考
1	トウキョウ	良聴語
2	フジノヤマ	難聴語
3	ミナミノハヤ	
4	手をあげてください	事業者が実際に使 用していた単文
5	生年月日を教えてください	
6	今日の体調はいかがですか	

3. 結果と考察

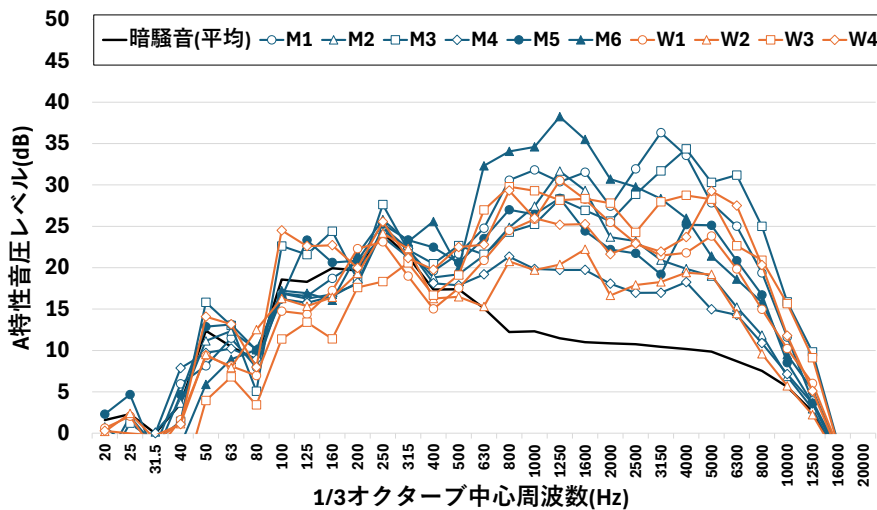
3.1 ささやき声の周波数分析結果と考察

6種類の文言ごとの、10名の参加者のささやき声の測定結果を図2(a)~(f)に示す。横軸は周波数、縦軸は音の大きさを表す代表的な指標であるA特性音圧レベルである。広範な帯域に渡って、特に630Hz以上5000Hz以下の周波数帯域においては、暗騒音よりもささやき声の音声の方が音圧レベルに関して上回っており、ささやき声はこれらの周波数帯域を主成分とすることが読み取れる。難聴語を多く含む「フジノヤマ」に関しては、4000Hzの帯域で音圧のピークをもつ参加者もみられるが、音圧のピーク値は1000Hzから2000Hzの帯域内でほとんどの文言と参加者において確認された。

文言による周波数特性について考察すると、「フジノヤマ」のような難聴語を多く含む文言よりも良聴語を多く含む文言のほうが、ピークをもつ周波数帯域が1000Hz付近となりやすい可能性がある。単語だけでなく、今回使用した単文は、良聴語を多く含んでおり、1000Hz付近をピークにもつことが多いことも読み取れる。よって、ささやき声検査に使用する文言として、良聴語を多く含む単語や、実際の鉄道事業者で使用されていた単文を用いることは、より均一な検査になる可能性が示唆された。

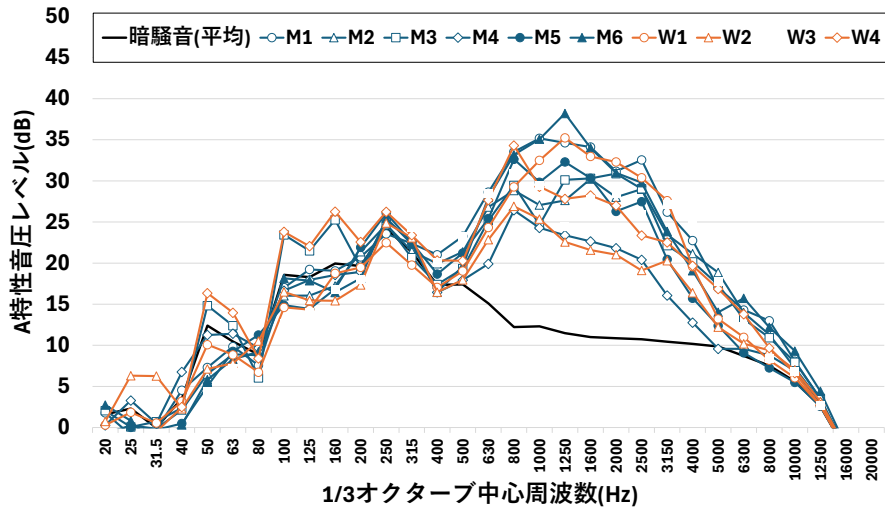


(a) トウキョウ

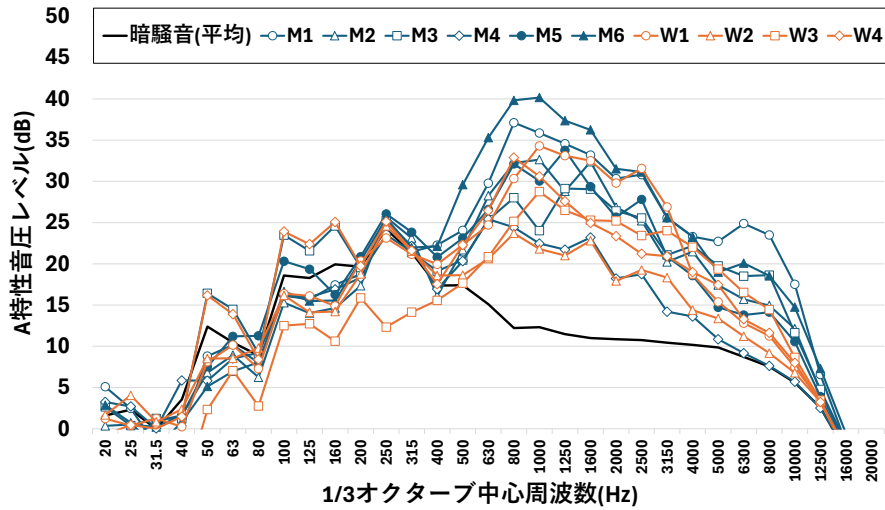


(b) フジノヤマ

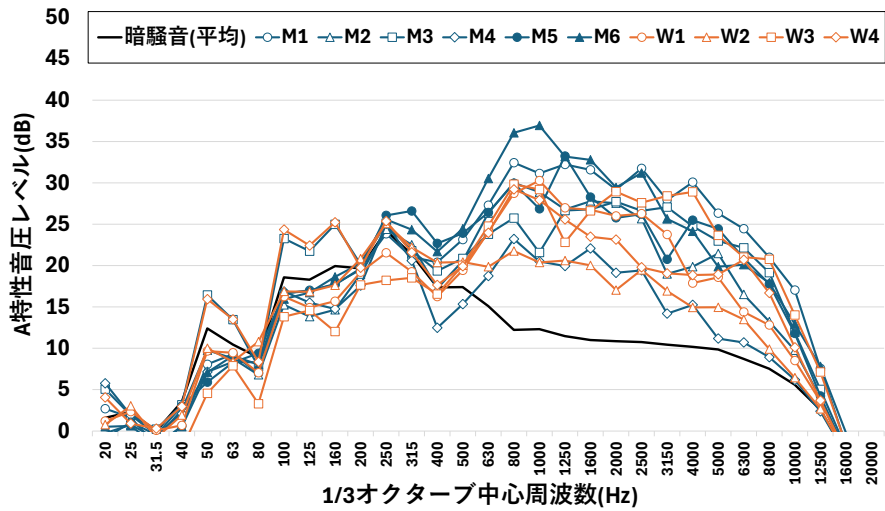
図2 6種類の文言の1/3オクターブ分析の結果



(c) ミナミノハヤ

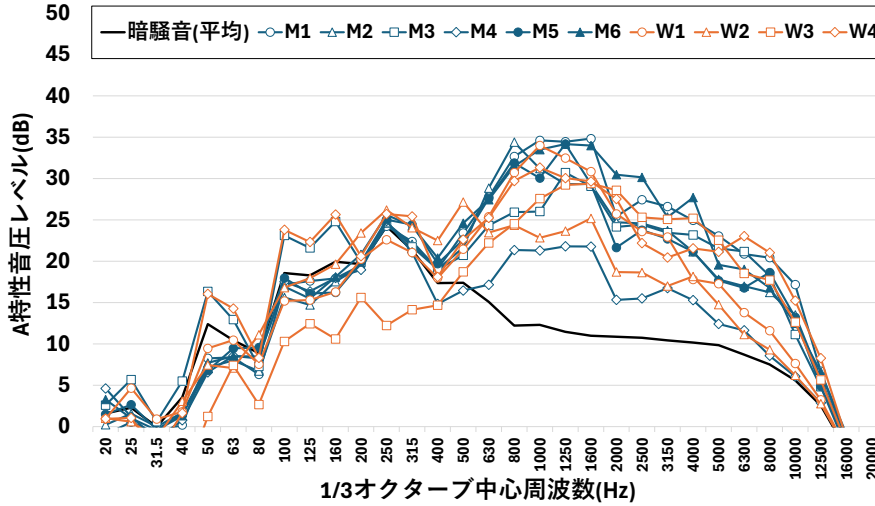


(d) 手をあげてください



(e) 生年月日を教えてください

図2 6種類の文言の1/3オクターブ分析の結果



(f) 今日の体調はいかがですか

図2 6種類の文言の1/3オクターブ分析の結果

3.2 鉄道事業者での測定結果との比較

図3に、本調査で得られたささやき声の4つの中心周波数帯域（500Hz，1000Hz，2000Hz，4000Hz）における文言と暗騒音の音圧レベルの対数平均値について求めた結果を示す。図4には、2023年度までに実施された鉄道事業者における無声音のささやき声と暗騒音の測定結果²⁾を示す。本調査の結果からは、無

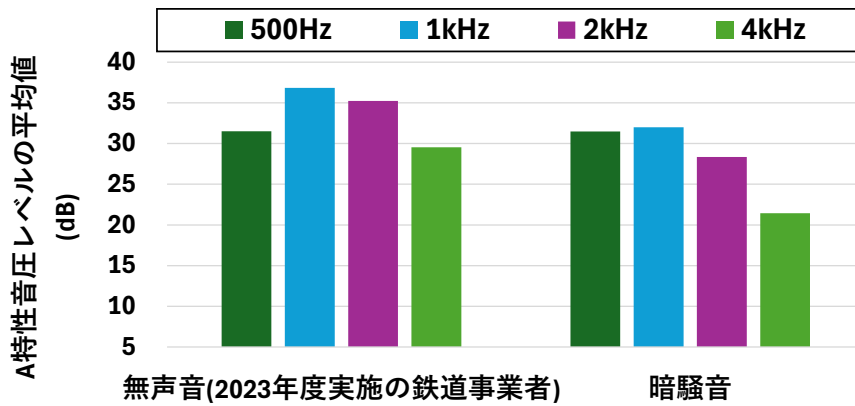


図3 文言と暗騒音の周波数帯域別の音圧分布

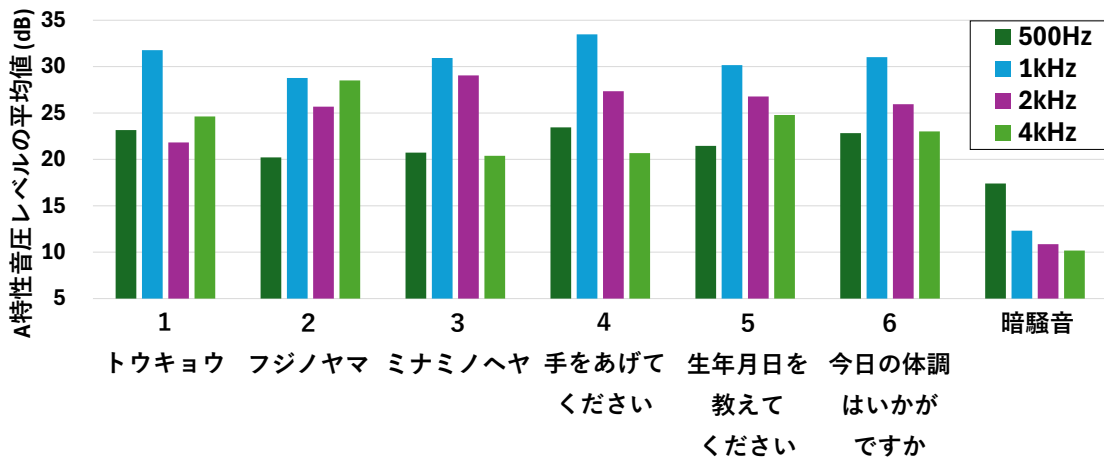


図4 2023年度実施の鉄道事業者の無声音と暗騒音

声音の中心周波数帯域が 1000Hz の音圧は 30dB 前後であったが、先行調査の鉄道事業者では 35dB から 40dB となっていたことから、音圧レベルに差異がみられた。

この理由としては、室内の音環境である暗騒音の大きさの差異による影響があげられる。暗騒音の大きさを比較すると、本調査では中心周波数帯域が 1000Hz の音圧レベルは 10dB から 15dB の範囲であったが、鉄道事業者で測定した暗騒音は、中心周波数帯域が 1000Hz で 30dB を越えており、暗騒音による影響が大きく異なることが予想される。よって、本調査と鉄道事業者の室内の暗騒音が異なったことが、ささやき声の音圧レベルの大きさに影響したと考えられるが、1000Hz 付近にピークがある点は共通していた。

4. まとめ

ささやき声方式の聴力検査のマニュアル化において、検査に適した文言案を選定するため、「ささやき声」の文言について、国からの委託を受けて調査を実施した。10名の6種類のささやき声の5m離れた位置における測定で得られた音圧・周波数の分析結果から、以下のことが明らかになった。

- (1) 無声音によるささやき声は、文言の種類や検査者によらず、1000Hz 付近にピークを持つ場合が多いことが確認された。ただし、復唱させる文言に「フジノヤマ」のような難聴語を多く含む単語を用いる場合には、4000Hz 付近にピークをもつ検査者もみられたため、マニュアルとして均一的になる文言としては、良聴語を多く含む単語や、鉄道事業者でも使用されていた単文を使用することが推奨された。
- (2) 鉄道事業者で測定された無声音のささやき声と本調査のささやき声を比較すると、音圧レベルの大きさは測定する室内の音環境に依存することが示唆されたが、1000 Hz 付近にピークを持つ場合が多いという同様の傾向であることが確認できた。

謝 辞

本研究は「動力車操縦者の身体検査に関する調査検討会」における検討の一環として実施したものです。検討会メンバーおよび関係者の皆様に深謝の意を表します。

文 献

- 1) 日本鉄道運転協会：鉄道運転士の聴力に関する調査検討報告書，日本鉄道運転協会，2013
- 2) 星野慧，斎藤綾乃，鈴木浩明，笠原悦夫，山本尚寿：ささやき声方式を用いた運転士の聴力検査の実態調査，鉄道総研報告，Vol.39，No.5，pp.11-16，2025
- 3) 日本鉄道運転協会：令和5年度動力車操縦者の身体検査に関する調査検討報告書，2024
- 4) 堀口申作：聴力検査の実際，南山堂，1966
- 5) 日本鉄道運転協会：令和6年度動力車操縦者の身体検査に関する調査検討報告書，2025
- 6) 動力車操縦者の身体検査に関する調査検討会：動力車操縦者 身体検査マニュアル（令和8年3月），2026

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	重枝秀紀	石毛 真	武内陽子
坪川洋友	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
半田和行	池田 学	宇田東樹	遠藤広晴
富田 優	豊岡亮洋		

鉄道総研報告 第40巻 第5号

2026年5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

©2026 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. 40 No. 5

May 2026

PAPERS

- Conventional Evaluation Method for Railway Embankment Settlement due to Damage and Water Infiltration to Small-diameter Pipe Under Track
..... T.MATSUMARU, T.SATO, K.SHIMAMOTO, H.MORI (1)
- 3D Reconstruction of Railway Track-side Environments Using Forward-Facing Smartphone Videos Captured on a Train
..... K.KAJIHARA, H.TANAKA (10)
- Development of a Method for Measuring Platform Height and Gap Using Forward-View Train Images
..... K.MATSUOKA, Y.NAKADA, S.KATO (20)
- Evaluation of Seismic Running Safety of Railway Rolling Stock and Restorability of Continuous PC Girder Bridges with Seismic Isolation Bearings
..... K.NARITA, M.TOKUNAGA, M.IKEDA (29)

RESEARCH REPORT

- Sound Pressure and Frequency Characteristics of Whispered Voices Used in Hearing Tests for Railway Drivers
..... K.HOSHINO, N.KURATOMO, T.UEDA, H.SUZUKI, N.YAMAMOTO (38)

