

鉄 道 総 研 報 告

第39巻 第6号

2025年6月

論文

- 車両** 機械式の接触センサを用いた貨車の脱線検知
..... 間々田祥吾, 太田達哉, 宮原宏平, 小杉一斗 (1)
- 車両** **施設** 地震時の軌道面振動特性を広範に考慮した車両の地震時走行安全性評価法
..... 飯田浩平, 名波健吾, 葛田理仁 (11)
- 施設** 2 方向水平力を受けるラーメン高架橋柱梁接合部の耐荷機構
..... 小西亮太, 中田裕喜, 渡辺健 (17)
- 施設** 線路周辺画像解析エンジンの暗所画像への適用
..... 清水惇, 箕浦慎太郎 (27)
- 施設** 数値解析による RC ラーメン高架橋における構造物音の部材別寄与度の定量化
..... 渡辺勉, 宇田東樹, 阿久津真理子, 清野多美子 (35)

機械式の接触センサを用いた貨車の脱線検知

間々田 祥吾* 太田 達哉* 宮原 宏平** 小杉 一斗***

Derailment Detection of Freight Wagon Using Mechanical Contact Sensors

Shogo MAMADA Tatsuya OTA Kohei MIYAHARA Kazuto KOSUGI

In long freight trains, if a freight wagon derails away from the locomotive, there may be a delay in detecting the derailment. In such cases, there is a concern that the wagons may continue to run while derailed, causing severe damage to track components, and therefore there is a need for early detection of wagon derailment. Therefore, the authors investigated a derailment detection method using mechanical contact sensors as one of several methods, since the contact sensors is too useful to detect wagon derailment. In this study, based on the results of past accident investigations and simulation results, two locations on the bogie of a wagon were selected as suitable locations for the installation of contact sensors. In addition, in order to evaluate the derailment detection performance of the proposed method, derailment tests on actual tracks were carried on freight wagons using bogies with contact sensors. The test results showed that the proposed method using contact sensors could detect a derailment immediately after it occurred.

キーワード：貨車，脱線，脱線検知手法，機械式の接触センサ，事故調査，シミュレーション，脱線試験

1. はじめに

長大編成として走行する貨物列車では，機関車から離れた貨車が脱線した場合に脱線の認識が遅れることがある¹⁾。そのような場合，貨車が脱線した状態で一定の区間を走行することにより，まくらぎやレール締結装置などの地上設備の被害を拡大させる恐れがあるため，貨車の脱線を早期に検知する手法の導入が求められている¹⁾。

旅客車では，脱線の検知手法として車両に搭載した振動加速度センサや角速度センサを利用した状態監視装置の適用が数多く検討され，一部が実用化されている^{2) 3) 4)}。これらの手法は，車両に搭載された状態監視装置で測定される振動加速度や角速度にしきい値を設け，通常走行時と脱線時とを区別するものであり，貨車においても同様の手法の適用が検討されている^{5) 6)}。一方，本手法の場合は，以下に示す理由により，貨車への導入に課題が残されている。

- ・貨車は1次ばね，2次ばねとも支持剛性が高いため，走行速度の変化に伴う軌道からの入力の変化の影響を受けやすい。さらに，貨車は積載重量等の違いによって車両状態が大きく変化することに加え，走行線区も多岐にわたることなどから，振動加速度や角速度のしきい値の設定に課題が残る。
- ・貨車は旅客車と比較して振動加速度が大きいいため，荷

役作業時と低速脱線時の判別が困難である。

- ・貨車への安定的な電源供給が困難であるため，小型のバッテリーなどを利用した省電力での判定が可能なセンサや判定装置が求められる。
- ・貨車は両数が多いため，高価なセンサおよび判定装置の適用が困難である。

そこで，筆者らはスイッチ等として使用される機械式の接触センサを台車に設置して脱線を検知する手法を検討した。接触センサの詳細については後述するが，通常，電氣的に不通または導通の状態から，対象物との接触により，逆の状態に変化するものである。接触センサの適用を検討した理由は以下の通りである

- ・これまでの知見において，脱線時には台車の特定の箇所が台車内の他の部材やレールなどの地上設備と接触することが示されている^{1) 7)}。
- ・電氣的に逆転した状態（導通および不通）を検知として判定するため，振動加速度センサや角速度センサを利用した場合のようにしきい値を判定するための複雑な演算処理などが必要なく，判定が簡易であり，判定する装置を低コストに構成できる。

本報告では，接触センサの設置箇所の選定方法および適用方法について述べるとともに，接触センサを設置した台車の貨車を脱線させ，脱線検知性能を把握する試験（以下，脱線検知試験）を実施した結果について述べる。

* 材料技術研究部 防振材料研究室

** 車両技術研究部 車両運動研究室

*** 元 車両技術研究部 車両運動研究室

2. 接触センサの設置箇所の選定

2.1 接触センサでの検知を想定する脱線形態

脱線の検知に接触センサを適用するためには、脱線時の車両の挙動を理論的に検討してモデル化することにより、脱線時にのみ接触する可能性のある箇所を選定して接触センサを設置する必要がある。ただし、過去に発生した貨車脱線事故における脱線形態は、曲線走行時の乗り上がり脱線、軌間拡大による軌間内脱線、分岐器リード部や氷雪への乗り上がり脱線などがあるが、それらすべてを考慮したあらゆる脱線形態において検知可能な設置箇所を抽出することは困難である。

そこで本検討では、駅係員など外部の目による脱線の発見が困難な本線上で発生し、かつ分岐器や氷雪など車輪・レール間の接触状態のモデル化が困難な要因が介在しない「曲線走行時の乗り上がり脱線」を検知対象として想定し、設置箇所を抽出した。

2.2 脱輪による車輪の落下挙動の検討

曲線走行時の乗り上がり脱線では、一般的にアタック角が最も大きくなる第1軸の外軌側車輪の横圧が増加し、同車輪がレールに乗り上がって脱線する^{2) 8) 9)}。そのため、脱線直後に検知可能な接触センサの設置箇所を抽出するためには、第1軸の脱線時における車両の挙動を検討する必要がある。そこで、第1軸がレールから脱輪して落下し、地上面に接触するまでの間の車両の挙動を力学モデルで検討し、台車内の各部位同士との接近量から接触する可能性のある箇所の抽出を試みた。

まず、力学モデルにおける第1軸の落下条件を具体的に設定するため、足立らによる車輪とレールの接触特性の計算方法¹⁰⁾を用いて外軌側車輪が乗り上がった際の車輪とレールの幾何的な接触位置を計算し、輪軸がどのように脱輪するか検討した。その結果、レールに乗り上がった外軌側の車輪よりも先に内軌側の車輪が脱輪・落下することがわかった。そこで、力学モデルによる車輪落下時における車両の挙動の検討では、輪軸片側の車輪のみが落下すると仮定した。

2.3 力学モデル

理論検討の対象とした車両の台車外観および各部位の名称を図1に示し、検討で用いた半車体の力学モデルを図2に示す。

力学モデルでは、右カーブを想定した曲線走行中に外軌側の車輪が乗り上がり、図2に示す第1軸の進行方向に対して内軌側に当たる右側の車輪（以下、第1右車輪）が先に脱輪する場合を想定し、同車輪直下のレールを計算開始直後に消失させ、車輪が落下する際の車両各部位の変位量を求めた。ここで、各部位の自由度は車体が2自由度、台車枠が4自由度および第1軸が2自由

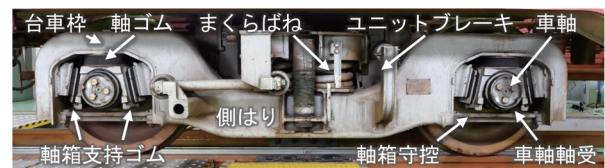


図1 力学モデルの対象とした台車の外観

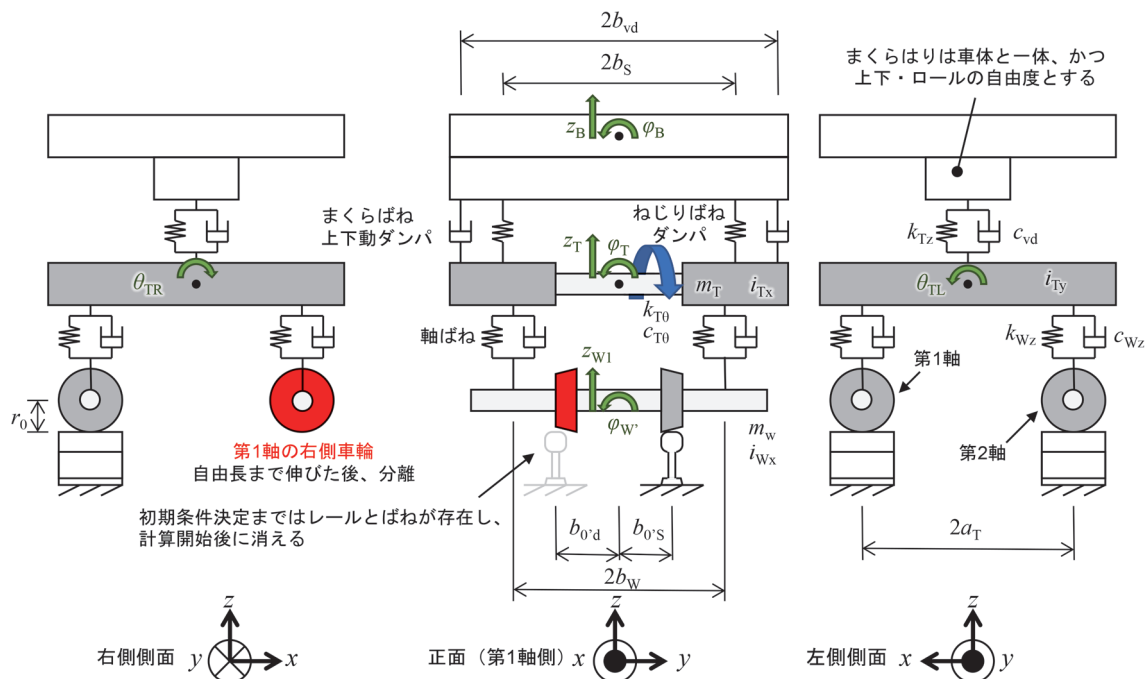


図2 理論検討で用いた半車体の力学モデル

度の計8自由度とし、第2軸は固定状態として自由度を持たないものとした。

2.4 理論検討の結果

2.4.1 第1右車輪の落下量

理論検討における結果として、第1右車輪の落下量と時間の関係を図3に示す。

図3より、第1右車輪が50kgN レール高さと車輪フランジ高さの差である126mm落下し、地面上に接触するまでに要する時間は約0.13秒であることがわかった。そこで、接触センサの設置箇所には、車輪が落下中の約0.13秒間における変位が大きく、台車各部位同士の接近量から接触の可能性がある箇所を抽出した。抽出した箇所の詳細を以下に示す。

2.4.2 抽出した接触センサの設置箇所

理論検討に基づき、接触センサの設置箇所として抽出した箇所は、輪軸の車軸近傍に設置される軸箱守控である。同箇所は、輪重によって圧縮されていた軸ゴムや軸箱支持ゴムが上下方向に解放され、車軸が台車枠より早く落下して軸箱守控と車軸軸受が接近すると考えられ、理論検討の結果において他の箇所より接近することがわかった。さらに、過去の脱線の事故調査では軸箱守控上面に車軸軸受との接触痕が多数見つかった⁷⁾。

以上の理由から、軸箱守控上面を接触センサの設置箇所として選定した(図4)。

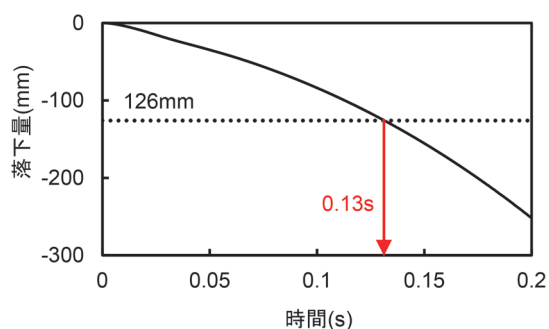


図3 第1右車輪の落下量と時間の関係



図4 接触センサの設置箇所

3. 接触センサの適用方法

3.1 接触センサの選定

接触センサには、図5に示すように、検知対象との接触により、電氣的に不通の状態から導通の状態に変化するA接点方式および導通の状態から不通の状態に変化するB接点方式の2種類がある。本検討では、サイズやコストなどを考慮してA接点方式にT05GY1 (IDEC (株) 製)、B接点方式にタッチオフセンサーN ((株) アイデル製)を選定した。選定した接触センサの外観を図6に示す。図に示すように、センサの幅はともに約20mmであり、厚さは、A接点方式が約5mm、B接点方式が約11mmである。なお、長さは使用する際の状況に合わせて変更した。

選定した接触センサは、A接点、B接点方式ともに10N~15Nのわずかな荷重によって検知できるが、台車に接触センサを直接設置した場合、走行中の雪塊などの飛来物との接触が誤検知につながる可能性がある。そこで、図7に示すような接触センサを保護するゴムカバーと組み合わせることにより、対象物と接触し、一定以上の荷重が加わった場合のみ検知可能なセンサ(以下、脱線検知センサ)を作製した。

3.2 脱線検知センサ

脱線検知センサのゴムカバーには、図7に示すように、上部鉄板と下部鉄板の間にゴムを介在させた。また、

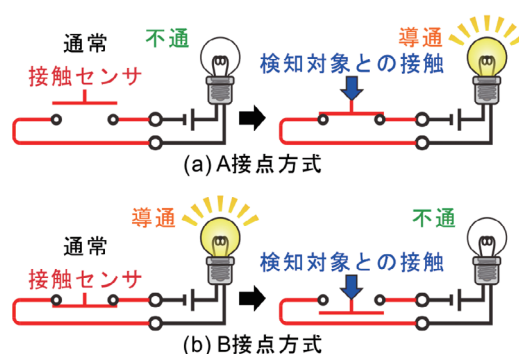


図5 接触センサの動作機構



図6 選定した接触センサの外観

ゴムカバーの上部鉄板の内側には接触センサと接触させる接触子を取り付けられる構造とした。ゴムカバーおよび接触子の形状や材質は、接触センサの種類によって異なるが、ゴムカバーを介すことにより、ゴムを变形させる程度の荷重が加わった場合にのみ、接触子がセンサを押し込むことができる。

脱線検知センサは、A 接点方式、B 接点方式の2種類の接触センサに対して形状の異なるゴムカバーを組み合わせた2種類とした。以下、A 接点方式の脱線検知センサをAタイプ、B 接点方式の脱線検知センサをBタイプとする。AタイプおよびBタイプの外観を図8に示す。なお、図では内部が見えるようにゴムカバーを裏返した状態を示す。各脱線検知センサの特徴を以下に示す。

- ・AタイプおよびBタイプのどちらも、接触センサがゴムカバーで覆われる構造とした。
- ・接触センサを設置する位置は、Aタイプが実際の軸箱守控上面とし、Bタイプが軸箱守控と同形状の治具に溝加工をした中とした。
- ・Aタイプの接触子はゴム製としたが、これはA接点方式のセンサが薄く、接触した際に切断されるのを防ぐためである。一方、Bタイプの接触子は金属製とし

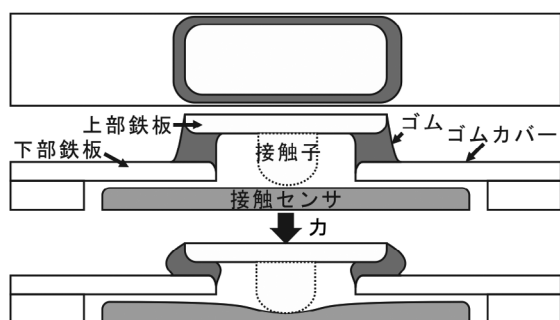
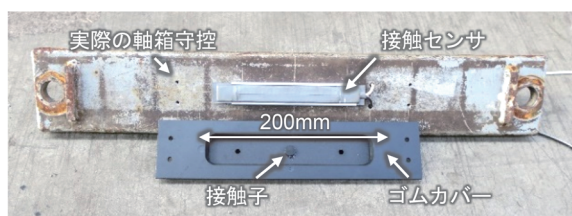
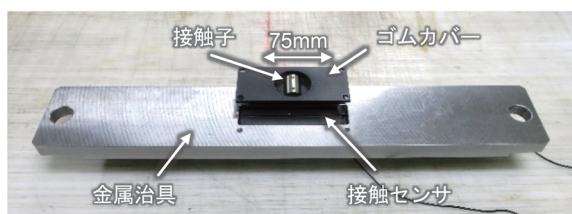


図7 ゴムカバーの概略図



(a) Aタイプ



(b) Bタイプ

図8 脱線検知センサの外観

たが、これは接触センサまでの距離が離れており、ゴム製の接触子の取付けが困難であったためである。なお、接触子の形状は、接触センサの厚さ、形状に応じて変更したが、どちらもゴムカバーが約1mm変形した際に検知できるように調整した。

- ・ゴムカバーの長さは、Aタイプが200mm、Bタイプが75mmとした。これは、Bタイプを作製する際、軸箱守控と同形状の治具に長い溝を加工する手間を省くためである。

3.3 脱線検知センサによる検知性能

作製した脱線検知センサの検知性能を評価する試験（以下、検知感度試験）を実施した。試験の状況を図9に示す。図には、例としてAタイプの試験状況を示す。

図9に示すように、検知感度試験では材料試験機に脱線検知センサを設置して上方向から載荷した。載荷する際は、実際の脱線検知センサの接触状況を考慮し、車軸軸受を模擬した治具によって載荷した。試験では、荷重とゴムカバーの変位量を測定するとともに、脱線検知センサに抵抗計RM3545（日置電機（株）製）を接続し、抵抗値の測定結果から電氣的に不通または導通の状態の変化を評価した。

検知感度試験における荷重とゴムカバーの変位量の関係および抵抗計による導通状態の波形（以下、検知波形）の例を図10に示す。検知波形が変化した場合に検知したと判断されることから、その際の変位を検知変位、荷重を検知荷重とした。

図10より、検知の際、Aタイプは不通から導通に、Bタイプは導通から不通に変化した。また、検知変位はAタイプが約1mm、Bタイプが約0.9mmであり、検知荷重はAタイプが約1kN、Bタイプが約2kNであった。Aタイプ、Bタイプともに3体に対して検知感度試験を実施した結果、バラつきがあるものの、検知変位は $1.0\text{mm} \pm 0.3\text{mm}$ の範囲、検知荷重は $2\text{kN} \pm 1\text{kN}$ の範囲に収まっていた。バラつきの要因については、接触センサの個体差や接触子の形状の違いによるものと考えられる。

以上、検知感度試験の結果より、作製した脱線検知センサは、一定の荷重が加わることで検知できることがわかった。なお、脱線の際、脱線検知センサには輪軸の重

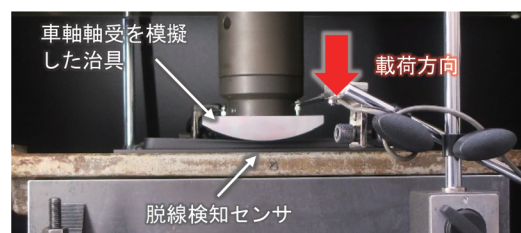


図9 脱線検知センサの検知感度試験の状況

量が加わることが想定される。輪軸の自重や脱線時に発生すると想定される重力加速度以上の加速度を考慮すると、脱線時には10kN以上の荷重が加わることが想定される。そのため、製作した脱線検知センサの検知性能に問題はないと考えられる。

4. 脱線検知試験

4.1 脱線方法

脱線検知試験では、図11に示す実車両に脱線検知センサを設置して実施した。脱線検知試験における車両の脱線方法を以下に示す。

図12に示すように、軌陸車が車両を押しながら一定距離を推進走行したのち、軌陸車を停車させることで、

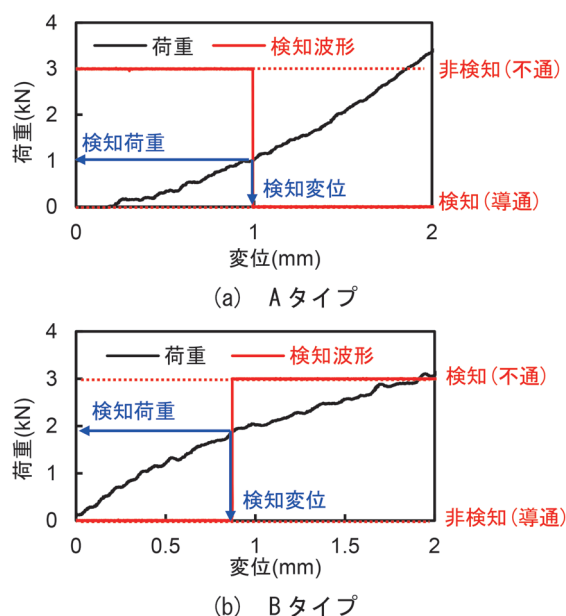


図10 検知感度試験の結果例



図11 脱線検知試験に使用した車両



図12 脱線器の設置状況

車両のみが惰性で走行を続ける。その後、脱線検知センサを設置した台車の車輪が、進行方向に対して左側のレールに設置された脱線器に乗り上がる。その際、左側の車輪のフランジが脱線器に沿ってレールから外れ、外軌側に脱輪することによって脱線する。ここで、脱線器による脱線時のアタック角は4°とした。これは、実際の脱線状況を考慮し、車輪がレールに乗り上がった後に1m程度走行して脱輪することを想定したためである。

なお、本試験は実車両を脱線させることから、脱線後の軌道への影響を考慮すると試験が可能な区間が限定される。そのため、選定の範囲が比較的広いと考えられた直線区間で乗り上がり脱線を再現することを想定し、片側のレールにのみ設置できる脱線器を製作した。一方、車両を推進する軌陸車が安全に停止できる距離、脱線後の車両が走行可能な距離を確保できる直線区間は選定できなかった。そのため、本試験は図12に示すように、進行方向に対して左カーブとなり、脱線器によってレールに乗り上がる車輪が2.3節における理論検討において検討した曲線の外軌側でなく内軌側である。ただし、理論検討の前段の検討では、レールに乗り上がる車輪と反対側の車輪が先に脱線することが想定されたが、後述するように、脱線検知試験においても脱線器に乗り上がった車輪と反対の車輪が先に脱線することがわかった。そのため、本試験における脱線は、理論検討で想定した乗り上がり脱線時の車輪落下の挙動が再現できていると考えられる。

4.2 脱線検知センサの設置箇所

脱線検知試験では、図13に示すように、同一台車の4箇所全ての軸箱守控に脱線検知センサを設置した。

4.3 測定項目

脱線検知試験における測定項目は、脱線検知センサの検知波形および車軸軸受と脱線検知センサの相対変位（隙間の接近量）とした。脱線検知センサの検知波形は、接触センサに出力電圧がDC5Vの電池を接続し、図5に示した電球の両端に当たる位置で電圧を測定した。そのため、Aタイプは0Vの状態から5Vに変化した場合、

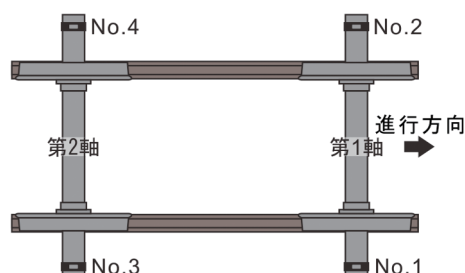


図13 脱線検知センサの設置箇所

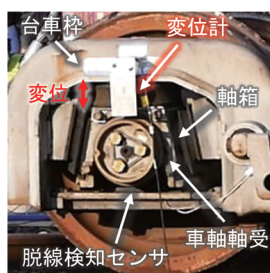
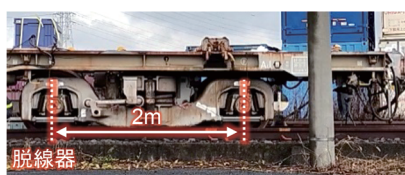


図 14 変位計の設置状況

表 1 脱線検知試験の試験条件

試番 No.	速度 (km/h)	センサ 方式	センサ No.*			
			1	2	3	4
1	5.6	B	19.0	19.5	19.5	19.5
2	7.5	B	20.0	20.0	19.5	19.5
3	7.2	B	19.5	20.0	21.0	19.5
4	14.0	A	20.0	20.0	19.5	20.0
5	14.8	A	11.0	12.0	12.0	11.0
6	15.6	A	11.0	12.0	11.0	10.0

*)センサ No.の箇所の数値は脱線検知センサと車軸軸受との距離(mm)を示す。

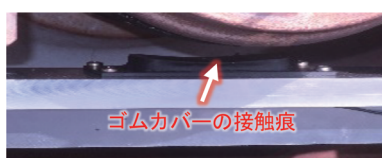


(a) 試番 No. 1

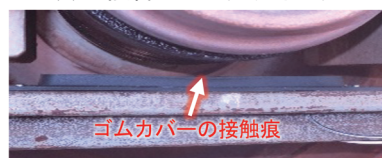


(b) 試番 No. 6

図 15 脱線後の台車の状態



(a) 試番 No. 1 (B タイプ)



(b) 試番 No. 6 (A タイプ)

図 16 脱線後の脱線検知センサの状況

B タイプは 5V の状態から 0V に変化した場合にそれぞれ脱線を検知したと判定される。また、車軸軸受と脱線検知センサの相対変位は、脱線時における車軸軸受と脱線検知センサとの接触状態を把握するため、図 14 に示す箇所に変位計を設置し、脱線検知センサが固定される台車枠と車軸軸受が固定される軸箱との間の相対変位を測定した。

4.4 試験条件

脱線検知試験の試験条件は、表 1 に示すように、脱線時の速度が 10km/h 以下の場合を 3 試番（試番 No.1～3）、10km/h 以上の場合を 3 試番（試番 No.4～6）の計 6 試番を実施した。また、車軸軸受と脱線検知センサとの距離は空車および積車の状態を模擬して約 10mm および約 20mm とした。

4.5 試験結果

全ての試番における脱線時の共通した状況として、第 1 軸の進行方向左側の車輪が脱線器に乗り上げた後、右側の車輪が先にレールから脱線した。これは、理論検討における想定と一致している。以下、速度が 10km/h 以下の試番 No.1（脱線検知センサ：B タイプ、速度：5.6km/h）および 10km/h 以上の試番 No.6（脱線検知センサ：A タイプ、速度：15.6km/h）における結果を例として示す。

脱線後の台車の状態を図 15 に示し、脱線検知センサの状態を図 16 に示す。図 16 には、全ての試番において脱線を検知できた第 2 軸のセンサ No.3 の状態を示す。

図 15 に示すように、脱線後は試番 No.1 および 6 ともにセンサを設置した台車のみが 2 軸とも脱線した状態であったが、試番 No.1 の場合は第 1 軸が脱線器から約 2m、試番 No.6 の場合は第 1 軸が脱線器から約 8m 進行して停止していた。また、図 16 に示すように、脱線検知センサのゴムカバーは、車軸軸受との接触によって変形していた。

次に、センサ No.3 の検知波形およびセンサ No.3 の設置箇所における車軸軸受とセンサの相対変位の波形を図 17 に示す。また、図 17 中の時間①および②における台車の状態を図 18 に示す。なお、図 17 では、相対変位が負の場合に車軸とセンサとの距離が接近することを示す。

図 17 における検知波形が示すように、試番 No.1、6 ともに第 1 軸の車輪が脱輪して着地した後、第 2 軸の車輪が脱輪し、着地する前に検知している。

脱線検知センサによる検知の状況を図 17 の相対変位の波形および図 18 (a) の時間①、図 18 (b) の時間①、

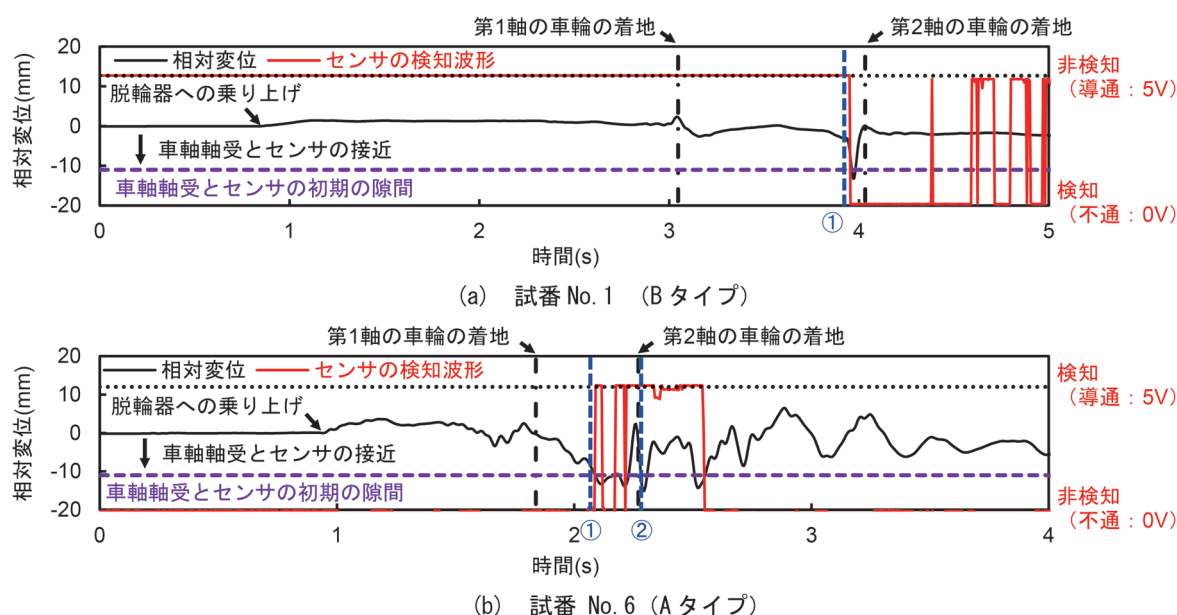


図 17 脱線検知センサの検知波形および変位計の波形

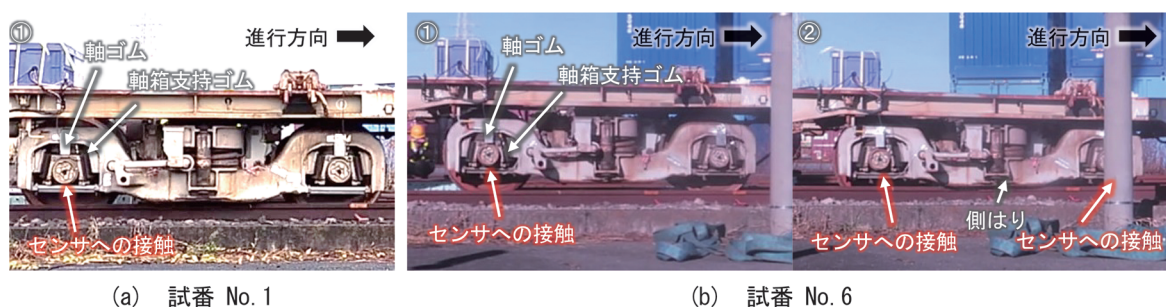


図 18 脱線検知センサによる検知の状況

②におけるセンサの検知波形に基づいて考察すると、以下の2つの条件によって検知できると考えられる。

一つ目の条件は、第1軸の車輪が着地した後の図17および図18における時間①において、第2軸の車輪が脱輪し、着地する間に検知した。この要因としては、第1軸の落下に伴って台車枠が進行方向にピッチングし、台車枠に固定されている軸箱守控えと車軸軸受との距離が近づくことに加え、第2軸の車輪がレールから離れることにより、圧縮されていた軸ゴムや軸箱支持ゴムが解放され、反発力が生じて台車枠よりも早く落下することが組み合わされたものと考えられる。

二つ目の条件は、第2軸の車輪が着地した後の図17(b)および図18(b)の時間②において、台車枠の側面がレールに乗り上げた際に検知した。この要因としては、台車枠の側面がレールに乗り上がることに伴って台車枠の高さ方向の位置が固定されるのに対して、車軸軸受の位置がまくらぎの通過に応じて上下に変動するため、車輪がまくらぎの間を通過する際に車軸軸受とセンサが接近して検知できると考えられる。また、

本条件の場合は、第1軸に設置したセンサ No.1 も車軸軸受と接触し、検知できた。なお、試番 No.1 の場合は、第2軸が落下した直後に台車が停止したため車輪がまくらぎの間を通過せず、第1軸および第2軸ともに車軸軸受とセンサが接近せず、本条件では検知しなかった。

4.6 試験結果のまとめおよび課題の抽出

全ての試番における結果のまとめを表2に示す。なお、表中の記述説明を以下に示す。

- ・センサ No. の箇所における数値は脱線検知センサと車軸軸受との距離 (mm) を示す。
- ・○は車軸軸受が脱線検知センサに接触して、検知波形の電圧値が変化したものを示す。
- ・×は脱線検知センサが接触せず、検知波形の電圧値が変化しなかったものを示す。
- ・△は脱線検知センサが接触せず、検知波形の電圧値が変化したものを示す。

表2より、センサ No.3 は、速度や車軸軸受との距離の条件に関係なく、全ての試番で脱線検知センサに接触

表 2 脱線検知試験の試験結果のまとめ

試番 No.	速度 (km/h)	センサ 方式	センサ No.			
			1	2	3	4
1	5.6	B	19.0	19.5	19.5	19.5
			x	x	○	x
2	7.5	B	20.0	20.0	19.5	19.5
			○	x	○	△
3	7.2	B	19.5	20.0	21.0	19.5
			x	x	○	△
4	14.0	A	20.0	20.0	19.5	20.0
			○	○	○	○
5	14.8	A	11.0	12.0	12.0	11.0
			○	○	○	○
6	15.6	A	11.0	12.0	11.0	10.0
			○	○	○	○

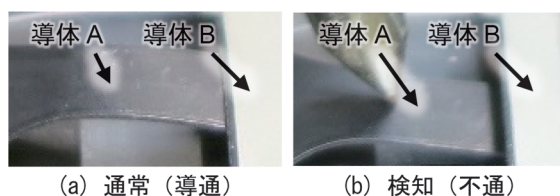


図 19 B 接点方式の接触センサの内部

した痕が見られた。なお、試験後に脱線検知センサの状態を確認した結果、センサ No.3 のゴムカバーは速度や車軸軸受との距離に関係なく、全て約 3.5mm 変形していた。

次に、接触センサの方式による違いについて、A タイプは接触した場合に全て検知波形の電圧値が変化していたのに対して、B タイプは接触していない場合にも検知波形の電圧値が変化した場合（表中の△）があった。この要因について、B 接点方式の接触センサにおける通常の状態では、図 19 (a) に示すように、2 体の導体 A および B における片側の導体 A がばねの要素で反対側の導体 B に接触して電氣的に導通している。一方、荷重が加わった場合は、図 19 (b) に示すように、ばね要素で支持されていた導体同士の接触が外れて不通となる。脱線検知試験では脱線の際に発生する著大な振動によって、車軸軸受が脱線検知センサに接触していないに関わらず、2 体の導体の接触が瞬間的に外れ、瞬間的に不通となった可能性が考えられる。ただし、脱線検知試験での B 接点方式における電気状態の変化は、脱線に起因するものであり、JIS E 4031「鉄道車両用品 - 振動および衝撃試験方法」に準拠した試験を別途実施した際に同様の現象は発生しなかった。その一方で、前述したように貨車は支持剛性が高いため、通常の走行においても継ぎ目等を通過する際などに脱線検知装置を搭載する台車枠には比較的大きな振動が発生し、同様の事象が発生する可能性がある。そのため、今後、B 接点方式の接触センサについては、実軌道における走行試験等を通じて性能を評価する必要がある。

以上、脱線検知試験結果より、同一台車の 2 軸とも脱

線した場合は、脱線検知センサによって脱線の直後に検知できることがわかった。一方、本試験結果より、第 1 軸のみが脱線した場合は、脱線検知センサによって脱線の直後に検知することが困難である可能性が考えられる。ただし、本脱線検知試験では再現できなかったが、第 1 軸のみが脱線した状態で進行し、まくらぎ上などを通過した場合は車軸が上下に大きく振動すると想定され、軸箱守控えと接触して検知できる可能性がある。このような状況については、今後シミュレーション等を活用した検討が必要であると考えられる。

5. 結言

貨車が脱線した後の地上設備への被害を軽減するため、脱線を早期に、簡易に検知できる新たなセンサの導入が求められている。そこで、機械式の接触センサを台車に設置して脱線を検知する手法を提案し、その性能を評価した。その結果、以下の知見を得た。

- 1) 理論検討の結果および過去の知見に基づき、接触センサの設置箇所として脱線の際に車軸軸受と接触する可能性がある軸箱守控上面を選定した。
- 2) 誤検知を防止するため、接触センサを保護するゴムカバーと組み合わせた脱線検知センサを作製した。脱線検知センサの検知感度を評価した結果、接触によって約 1mm 変形した際に検知できることがわかった。なお、その際の荷重は $2\text{kN} \pm 1\text{kN}$ であった。
- 3) 脱線検知センサを設置した台車を設置した実車両を脱線させ、センサによる脱線検知性能を評価する脱線検知試験を実施した。その結果、脱線検知センサは第 2 軸が落下した際やその後の走行によって検知できた。

以上、脱線検知試験の結果、脱線検知センサによって脱線を早期に検知できることがわかった。その一方で、B 接点方式の接触センサを用いた場合は、誤検知が発生する可能性があるなどの課題も抽出されたことから、今後は実用化に向けた走行試験等を実施し、センサの信頼性などを評価するとともに、脱線検知センサで得られた脱線の情報を機関車の運転台まで伝送する手法についても検討が必要である。

文 献

- 1) 運輸安全委員会：日本貨物鉄道株式会社 成田線 久住駅～滑河駅間 列車脱線事故，鉄道事故調査報告書，RA2012-5，2012
- 2) Hung, C., Suda, Y., Aki, M., Tsuji, T., Morikawa, M., Yamashita, T., Kawanabe, T. and Kunimi, T., Study on detection of the early signs of derailment for railway vehicles, Vehicle System

- Dynamics, Vol.48, Supplement, pp.451-466, 2010.
- 3) 大山寛人, 長本昌樹, 松岡茂樹, 矢野健太, 前田郁: ツインセンサ型脱線検知装置の開発, 第25回鉄道技術連合シンポジウム 講演論文集, No.18-83, 2018
 - 4) 斎藤憲司, 三須弥生, 吉田豊: 脱線検知装置の開発, JR East Technical Review, No.2, pp.69-72, 2003
 - 5) Diana, G., Sabbioni, E., Stomaching, C., Tarsitano, D., Cavicchi, P., Di Mario, M. and Labbadia, L., Full-scale derailment tests on freight wagons, Vehicle System Dynamics, Vol.60, No.6, pp.1849-1866, 2022.
 - 6) 今井一富: コンテナ貨車状態監視装置の開発, R & M, No.6, pp.20-24, 2014
 - 7) 運輸安全委員会: 日本貨物鉄道株式会社 江差線 釜谷駅～泉沢駅間 列車脱線事故, 事故調査報告書, RA2015-9, 2015
 - 8) 飯島仁, 吉田尚, 鈴木宏輔, 安田陽一: 構内線における低速乗り上がり脱線のメカニズム究明と安全性評価に関する研究, JR East Technical Review, No.49, pp.25-28, 2014
 - 9) Tanaka, K., and Sugiyama, H., Prediction of railway wheel load unbalance induced by air suspension leveling values using quasi-steady curve negotiation analysis procedure, Proceedings of Institution of Mechanical Engineers, Part K, Vol.20, pp.19-37, 2020.
 - 10) 足立雅和, 下村隆行, 佐藤栄作: 車輪とレールの摩耗を考慮した接触状態解析手法の開発, 鉄道総研報告, Vol.20, No.6, pp.17-22, 2006

地震時の軌道面振動特性を広範に考慮した 車両の地震時走行安全性評価法

飯田 浩平* 名波 健吾** 葛田 理仁*

Method for Evaluating Running Safety of Railway Vehicles during Earthquake Using
Extensive Characteristics of Seismic Track Vibrations

Kohei IIDA Kengo NANAMI Masahito KUZUTA

This paper proposes a method for evaluating the running safety of a railway vehicle during an earthquake taking into account the characteristics of seismic waveforms and structures. Firstly, the characteristics of seismic track vibration taking into account both earthquakes and structures are derived from the measured data of past earthquakes and a wide range of structural natural periods. Secondly, the running safety index for seismic wave is calculated from the characteristics of the seismic track vibration and the running safety limit diagram for sinusoidal excitation. It is confirmed that the running safety index has a roughly linear relationship with the estimated derailment occurrence probability during earthquakes using the method described in a previous paper.

キーワード：鉄道車両，走行安全性，地震，安全性評価法，構造物振動特性

1. はじめに

2004年の新潟県中越地震における新幹線列車脱線事故¹⁾以降，主に新幹線を対象に地震時走行安全性向上に関する研究開発が盛んになっている。研究開発を進める上で，地震時走行安全性を評価する必要がある，これまで以下の評価法が用いられてきている。

- ・正弦波加振に対する安全限界線図²⁾
- ・地震動の波形を用いた脱線発生確率の推定³⁾

前者は，加振周波数毎に正弦波5波を入力したときに脱線しない限界の加振振幅（安全限界振幅）をプロットしたもので，車両が有する地震時耐脱線性能の基礎特性を把握できる。解析に要する時間は，汎用PCを用いた場合に1車両条件あたり数時間程度で比較的短時間である。後者は，評価に用いるバックデータを得るための解析に時間を要するが（1車両条件あたり1週間～10日程度），地震動（地震時軌道面振動）に対する車両の脱線しやすさを確率という数値をもって把握することができる。

一方，車両は様々な地盤条件，構造物条件上の軌道を走行しているが，地震動や構造物の特性に起因する様々な軌道面振動特性を広範に考慮した地震時走行安全性評価法についての研究は皆無である。そこで，本研究では地震時の軌道面振動特性を広範に考慮した地震時走行安全性評価法について検討を行った。なお，本研究で検討

する地震時走行安全性評価法は，前述した従来の評価法と同様，構造物の地震時の振動に起因する影響は，構造物単体の振動による変位のみを考慮していることに留意する必要がある。

2. 従来評価法の課題と検討する評価法のコンセプト

地震時走行安全性を向上するための対策に関する研究開発を進めるにあたり，地震対策の有無で地震時走行安全性を比較する必要がある。

正弦波加振に対する安全限界線図を用いた比較では，一方の条件が全周波数領域において他方よりも安全限界振幅が大きければ明確な評価が可能であるが，図1に示すように，周波数領域によって大小が異なる場合には，比較が困難になるという課題がある。

地震動の波形を用いた脱線発生確率の推定を用いた比較では，地震時の脱線と相関の高い指標値を用いて，地震時の軌道面振動に対する各車両条件の脱線発生確率推定値を比較している。脱線発生確率推定値の算出法の詳

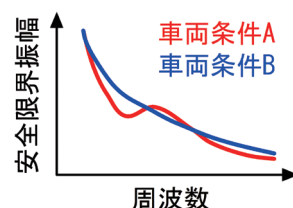


図1 正弦波加振に対する安全限界線図比較例

* 鉄道力学研究部 車両力学研究室

** 鉄道地震工学研究センター 地震応答制御研究室

細については文献3を参照されたい。比較自体の妥当性は高いと考えられるが、軌道面振動毎の比較であり、図2に示すように軌道面振動によって大小関係が異なる場合には、比較が困難になるという課題がある。また、前述したように地震時の軌道面振動特性を広範に考慮したものではない。

上記を鑑み、本研究では、以下の項目を満足する地震時走行安全性評価法を検討した。

- ・地震動や構造物の特性に起因する様々な軌道面振動特性を広範に考慮すること
- ・個別の軌道面振動条件に依存して評価結果が変わらないこと

そこで、鉄道車両の乗り心地評価指標である、乗り心地レベル⁴⁾の算出方法を参考に地震時走行安全性評価法のコンセプトを検討した。乗り心地レベルは車両走行時の床面振動加速度に対し、人体の等感度曲線に基づく乗り心地フィルタ処理を行った後、その実効値を求めることで算出している。地震時走行安全性に関しては、図3に示すように、車両が有する地震時耐脱線性能の基礎特性である正弦波加振に対する安全限界線図と、地震時の軌道面振動特性を広範に考慮した特性との比較により算出した周波数毎の走行安全性評価因子を周波数領域で積分することで地震時走行安全性評価値を算出することとした。

なお、本研究で検討する地震時走行安全性評価法は、地震動および構造物の特性を考慮した包括的な安全性評価を目的としており、個別の地震時軌道面振動に対する

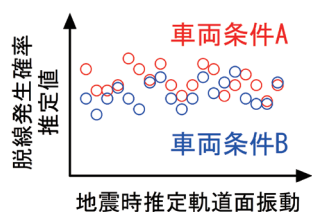


図2 地震動波形を用いた脱線発生確率比較例

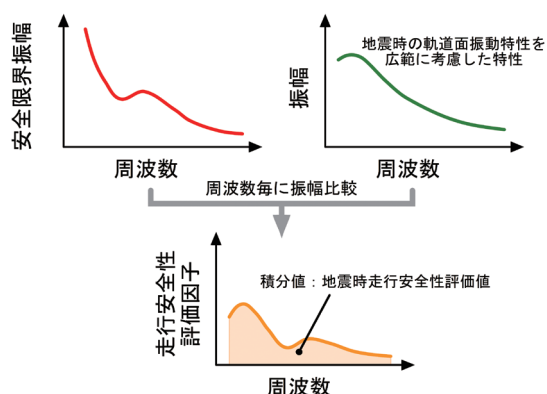


図3 検討する地震時走行安全性評価法の概念図

走行安全性については、地震動の波形を用いた脱線発生確率推定の方が妥当性が高いと考えられる。つまり、本研究で検討する評価法は概略評価、既存の脱線発生確率推定法が詳細評価の位置づけとなる。

3. 地震動や構造物の特性に起因する様々な軌道面振動特性

3.1 地震時軌道面振動の生成

地震動や構造物の特性に起因する様々な軌道面振動特性を広範に考慮するにあたり、地震動については、防災科学技術研究所強震観測網⁵⁾ (K-NET, KiK-net) にて実際に日本全国の地表面位置で観測された地震記録のうち水平動であるNS波（南北成分）およびEW波（東西成分）に着目し、下記の条件を満たす地震記録を抽出した。

- ・期間：1996年5月～2019年2月
- ・最大加速度：200gal以上

なお、地震記録は同じ観測地点におけるNS波とEW波はそれぞれ別の波形として扱い、結果として合計1928波を抽出した。また、構造物については1自由度系に簡略化して表現したうえで、上記で抽出した各地震動に対して下記の条件で動的応答解析を行い、構造物天端応答を軌道面振動と見なした。なお、構造物は線形の条件を仮定しており、構造物の損傷による剛性の変化は考慮していない。

- ・構造物固有周期：0.1秒～2.0秒、0.1秒刻み
- ・構造物減衰：5%

構造物固有周期は鉄道構造物等設計標準・同解説（耐震設計）⁶⁾を参考に範囲を設定している。構造物固有周期が20種あるため、地震動と構造物との掛け合わせで、最終的に1928×20=38560ケースの地震時軌道面振動波形を生成した。

3.2 地震時軌道面振動の周波数特性算出

生成した地震時軌道面振動に対して、フーリエ変換により周波数特性を求めた。一例を図4中、赤線で示す。得られた周波数特性の分解能は、後の処理で掛け合わせる正弦波加振に対する安全限界線図の分解能（0.1Hz刻み）よりもかなり細かく、かつ乱れがあるため、図4中青線で示すように、周波数特性の中央値を通るように

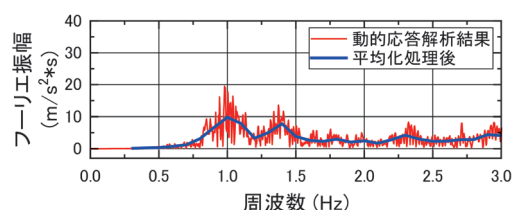


図4 地震時軌道面振動の周波数特性とその処理例

0.1Hz 刻みのデータに平均化処理を行うとともに、正弦波加振に対する安全限界線図と同じ周波数 0.3～3.0Hz の帯域を抽出した。

3.3 地震時の軌道面振動特性を広範に考慮した特性

3.1 節で生成した軌道面振動に対して 3.2 節の処理を行うことで、全ての軌道面振動の周波数特性データが周波数領域 0.3～3.0Hz で刻みが 0.1Hz のデータとなる。

得られた周波数特性データから地震時の軌道面振動特性を広範に考慮した特性を求めるため、振幅は正值であることから特性データは対数正規分布に従うと仮定し、周波数毎に平均値と標準偏差を求めた。

周波数毎に得られた対数正規分布の平均値と標準偏差に基づいて得られた、軌道面振動振幅の確率分布を図 5 に示す。図 5 は横軸に周波数を、縦軸に振幅を取り、周波数毎の対数正規分布における平均値と標準偏差に基づく累積分布を等高線図で示している。図中、黒細線は 0.1 刻みの等累積分布線である。また、黒点線で平均値 + 2σ (σ : 標準偏差)、黒破線で平均値 + 3σ の等累積分布線を示している。さらに、3.2 節で求めた軌道面振動特性 (平均化後) の各周波数における振幅最大値を黒太線で示す。図 5 より、平均値 + 3σ と解析上の最大値が、特に周波数 1.4Hz 以上の領域で一致していることが見て取れる。ここで、平均値 + 3σ の値を選択すると、過去に発生した地震動と一般的な構造物条件をほぼ包含する軌道面振動特性となるが、加速度にして 3000gal を超える振幅となる。実際には構造物が塑性変形し、ある一定以上の加速度は生じないため、3000gal という振幅が含まれるのは起こりうる軌道面振動という観点から、やや大きすぎる特性となる。そこで、ここでは平均値 + 2σ (97.7% のデータが含まれる) の値を以て、地震時の軌道面振動特性を広範に考慮した特性とすることを提

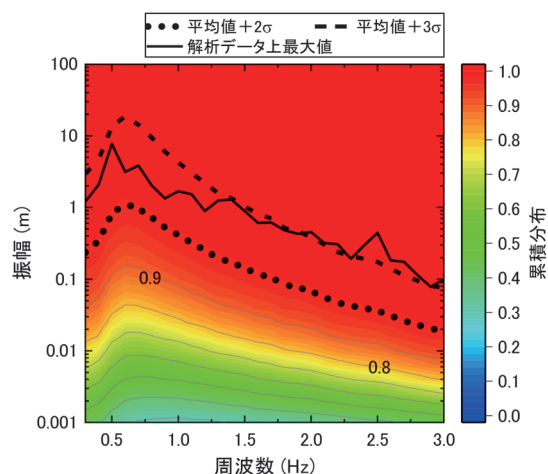


図 5 地震動と構造物の特性に起因する様々な軌道面振動の周波数特性分布

案する。なお、軌道面振動特性の取り方については、状況や目的に応じて様々な取り方があると考えられる。

4. 地震時走行安全性評価値の算出法

地震動の波形を用いた脱線発生確率の推定では、地震時の脱線と相関の高い指標値について検討を行った^{3) 7)}。その知見に基づき、本研究における地震時走行安全性評価値は以下の手順で求めることとした。

- (1) 評価対象車両について、5 波で脱線する限界線図 (正弦波加振に対する安全限界線図)、5 波で車輪上昇量が 10mm となる限界線図を求める。
- (2) 前章で求めた地震時の軌道面振動特性を広範に考慮した特性と前項の限界線図から、周波数毎に次式に基づいて安全性評価因子 $\lambda(f)$ を算出する。

$A(f) < D_{10\text{mm}}(f)$ の場合

$$\lambda(f) = 0 \quad (1)$$

$D_{10\text{mm}}(f) \leq A(f) < D_{5\text{w}}(f)$ の場合

$$\lambda(f) = \frac{A(f) - D_{10\text{mm}}(f)}{D_{5\text{w}}(f) - D_{10\text{mm}}(f)} \quad (2)$$

$D_{5\text{w}} \leq A(f)$ の場合

$$\lambda(f) = \frac{A(f)}{D_{5\text{w}}(f)} \quad (3)$$

ここで、 f : 周波数、 $A(f)$: 軌道面振動特性の振幅、 $D_{10\text{mm}}(f)$: 5 波で車輪上昇 10mm になる限界振幅、 $D_{5\text{w}}(f)$: 5 波で脱線する限界振幅である。限界線図と安全性評価因子 $\lambda(f)$ の関係の概略を図 6 に示す。図 6 中、上図においてある周波数に着目したときの振幅 A と安全性評価因子 λ との関係を下図に示す。

- (3) 前項で求めた $\lambda(f)$ を周波数 0.3～3.0Hz で積分し、地震時走行安全性評価値を算出する。

安全性評価因子 λ の値については以下の考えに基づいて設定した。

- (1) 軌道面振動振幅が正弦波 5 波の加振で車輪上昇量 10mm の限界振幅以下である場合、車両は脱線しないため、安全性評価因子 λ をゼロとする。
- (2) 軌道面振動振幅が正弦波 5 波の加振で脱線する限界振幅に等しい場合に安全性評価因子 λ を 1 とする。
- (3) 軌道面振動振幅が正弦波 5 波の加振で車輪上昇

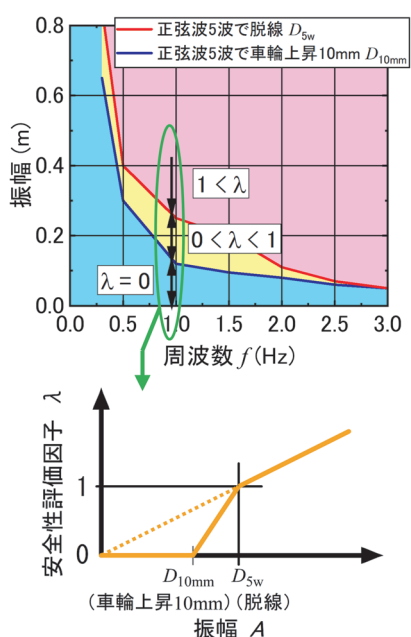


図6 限界線図と安全性評価因数との関係の概略

量 10mm の限界振幅と正弦波 5 波の加振で脱線する限界振幅との間の場合は、安全性評価因子 λ はゼロから 1 まで線形に増加するものとする。

- (4) 軌道面振動振幅が正弦波 5 波の加振で脱線する限界振幅よりも大きい場合は、振動振幅を正弦波 5 波の加振で脱線する限界振幅まで縮小すれば前項と同等になるため、安全性評価因子 λ は軌道面振動振幅を正弦波 5 波の加振で脱線する限界振幅で除した値とする。

軌道面振動振幅の方が安全限界振幅よりも大きいと安全性評価因子、ひいては地震時走行安全性評価値が大きくなるため、本研究で提案する手法では地震時走行安全性評価値が小さいほど地震時の走行安全性が良いことを意味する。また、本手法を用いて地震時走行安全性評価値を算出するのに要する時間の大部分は 2 種の正弦波加振に対する限界線図を求める時間であり、汎用 PC を用いた場合で 1 車両条件あたり 10 時間弱である。

5. 在来線車両を対象とした試算

本研究で提案する地震時走行安全性評価法の妥当性を検証するため、既報⁸⁾で検討を行った在来線車両の地震時走行安全性向上策に関して試算を行った。

5.1 試算条件

評価対象車両はヨーダンパを装備する在来線特急形車両とし、検討は以下の条件で実施した。

- ・走行速度：130km/h
- ・地震対策条件：

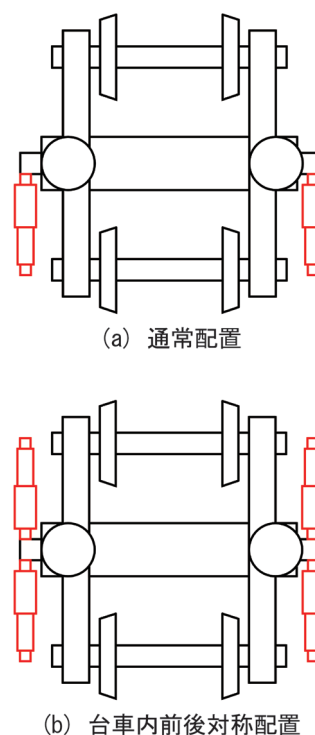


図7 ヨーダンパの配置



図8 在来線用脱線防止ガード⁸⁾

地震対策なし

ヨーダンパを台車内前後対称に配置 (図 7 (b))

在来線用脱線防止ガード (図 8) を設置

ヨーダンパ台車内前後対称配置および在来線用脱線防止ガード設置の併用

5.2 正弦波加振に対する安全限界線図

試算に先立ち、5.1 節に示した 4 つの解析条件に対し、従来評価法である正弦波加振に対する安全限界線図を図 9 に示す。図 9 より、地震対策なしに比べ地震対策をすることにより、安全限界振幅が増大し、地震時走行安全性が向上することがわかる。一方、脱線防止ガードを設置することと、ヨーダンパを前後対称に設置することのどちらがより効果的かは図 9 からは判断しにくいといえる。

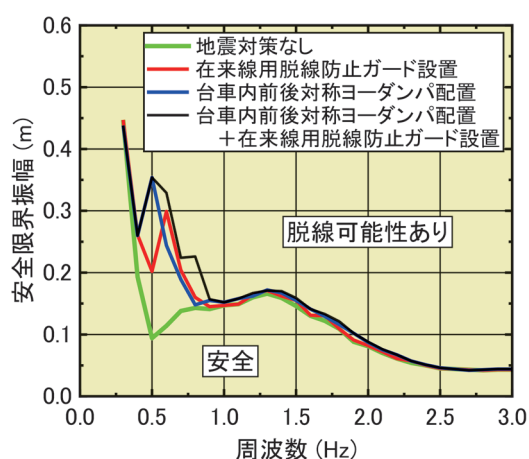


図9 ユーダンパを装備した在来線特急形車両の正弦波加振に対する安全限界線図

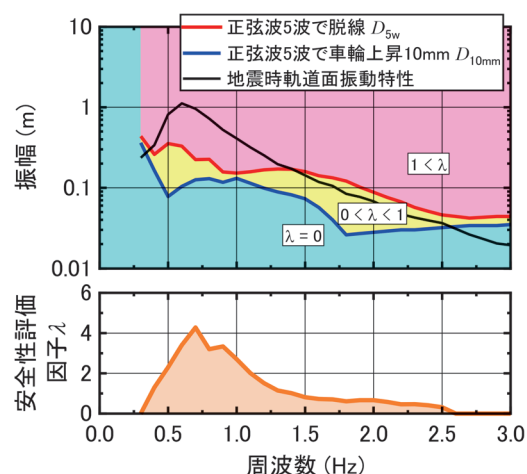


図10 提案手法を用いた地震時走行安全性評価値算出例

5.3 提案手法を用いた地震時走行安全性評価値算出

4章で述べた地震時走行安全性評価値の算出過程の一例として、在来線特急形車両において、ヨーダンパ台車内前後対称配置および在来線用脱線防止ガード設置の併用の地震時走行安全性向上策を施した場合を図10に示す。図10上図に、正弦波加振に対して、5波で脱線する限界線図および5波で車輪上昇量が10mmになる限界線図をそれぞれ赤線および青線で示す。さらに3章で求めた地震時の軌道面振動特性を広範に考慮した特性線図を黒線であわせて示す。また、図10下図に上図に示した2種の限界線図と地震時軌道面振動特性線図から4章に示した算出法で求めた安全性評価因子 λ を示す。

従来、正弦波加振に対する安全限界線図は図9に示すように縦軸を線形軸で示しているが、図10上図では軌道面振動特性の示しやすさから縦軸を対数軸としている。また、図10上図で示した「正弦波5波で脱線」のデータ(赤線)と図9に示した「台車内前後対称ヨーダンパ配置+在来線脱線防止ガード」のデータ(黒線)は

同一のデータである。

図10下図より、0.7Hz付近の安全性評価因子 λ が大きく(地震時の脱線発生へ影響度が大きい)、2.6Hz以上の周波数領域では安全性評価因子 λ がゼロで地震時の脱線発生に影響しないことがわかる。そして4章で述べたように、安全性評価因子 λ を0.3~3Hzの領域で積分することで地震時走行安全性評価値を算出する。すなわち、図10下図において橙色で塗られた領域の面積が地震時走行安全性評価値となる。

5.1節に示した4条件に対する地震時走行安全性評価値算出結果を図11に示す。図11より、地震対策を行うことで地震時走行安全性評価値が小さくなり、地震時走行安全性が向上していること、脱線防止ガードを設置することとヨーダンパを前後対称に設置することの効果は概ね等しいことがわかる。さらに両者を併用することでさらに地震時走行安全性が向上することがわかる。ここで、地震時走行安全性評価値と地震動の波形を用いた脱線発生確率推定値(3.1節で示した地震時軌道面振動38560波に対して求めた値の平均値)の比較を図12に示す。図12より、地震時走行安全性評価値は地震動の波形を用いた脱線発生確率推定値と概ね線形の関係となっていることがわかる。

以上より、本研究で提案する地震時走行安全性評価値

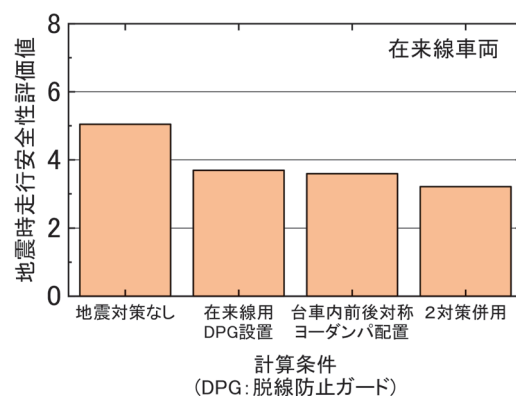


図11 地震時走行安全性評価値算出結果

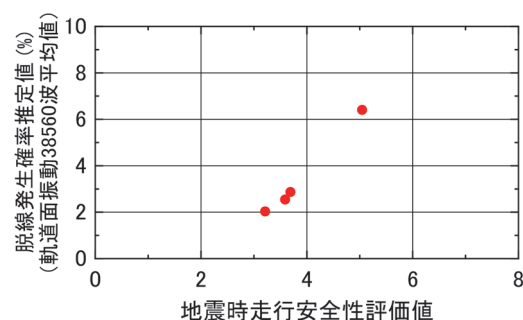


図12 地震時走行安全性評価値と従来法で求めた脱線発生確率推定値(平均値)との比較

は地震動や構造物の特性に起因する様々な軌道面振動に対する走行安全性を概略的に評価できていることが確認できたと言える。

6. まとめ

本研究では、地震時の軌道面振動特性を広範に考慮した地震時走行安全性評価法について検討をおこなった。得られた結果を以下に示す。

- (1) 2種類の正弦波加振に対する限界線図と地震時の軌道面振動特性を広範に考慮した特性との比較から、地震時走行安全性評価値を算出し評価することを提案した。地震時走行安全性評価値が小さいほど地震時に脱線しにくいことを意味する。また、提案手法は地震時軌道面振動を広範に考慮して概略的に評価する手法であり、従来の地震時軌道面振動波形から個々に脱線発生確率を推定する手法の方が詳細な評価となる。
- (2) 提案手法による評価に要する時間は、2種類の正弦波加振に対する限界線図を求める時間に概ね等しく、汎用のPCを用いて1車両条件あたり10時間弱である。
- (3) 提案手法を用いて、ヨーダンパを装備する在来線特急形車両を対象に、地震対策として、ヨーダンパを台車内前後対称に配置すること、および在来線用脱線防止ガードを設置することの地震時走行安全性評価値を試算した。提案手法で算出された地震時走行安全性評価値は、従来手法による地震時軌道面振動波形を用いた脱線発生確率推定値と概ね線形の関係を有していることを確認した。今後は、多様な車種で検討を行い、更なる妥当性の検証を行っていく計画である。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、東日本旅客鉄道株式会社より車両関係データ提供の協力を受けた。また、地震波形は防災科学技術研究所の強震観測網により公開されているものを使用した。この場を借りて謝意を表する。

文 献

- 1) 航空・鉄道事故調査委員会：東日本旅客鉄道株式会社上越新幹線浦佐駅～長岡駅間列車脱線事故，鉄道事故調査報告書，RA 2007-8-1，2007
- 2) 宮本岳史，石田弘明，松尾雅樹：地震時の鉄道車両の挙動解析（上下，左右に振動する軌道上の車両運動シミュレーション），日本機械学会論文集C編，Vol.64，No.626，pp.3928-3935，1998
- 3) 飯田浩平，宮本岳史，川西智浩：地震時における鉄道車両の脱線可能性を地震波から推定する方法，日本機械学会論文集，Vol.85，No.874，DOI: 10.1299/transjsme.18-00339，2019
- 4) 須田征男，長門彰，徳岡研三，三浦重編：新しい線路—軌道の構造と管理—，日本鉄道施設協会，pp.326-327，1997
- 5) 防災科学技術研究所：強震観測網 K-NET，KiK-net，<https://www.doi.org/10.17598/NIED.0004>（参照日：2024年10月3日）
- 6) 国土交通省鉄道局監修，鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説（耐震設計），丸善出版，2012
- 7) 飯田浩平，川西智浩：軌道面振動波形から脱線可能性を推定する指標の一般性に関する研究，日本機械学会第25回鉄道技術連合シンポジウム（J-RAIL2018）講演論文集，講演 No.1215，2018
- 8) 飯田浩平，葛田理仁，西山幸夫，金元啓幸，中嶋大智：ヨーダンパを装備した鉄道車両の地震時走行安全性向上に関する研究，日本機械学会論文集，Vol.87，No.902，DOI: 10.1299/transjsme.21-00065，2021

2 方向水平力を受けるラーメン高架橋柱梁接合部の耐荷機構

小西 亮太* 中田 裕喜* 渡辺 健*

Load-bearing Mechanism of Beam-column Joints of Rigid Frame Viaducts Subjected to Horizontal Forces in Two Directions

Ryota KONISHI Yuki NAKATA Ken WATANABE

In order to clarify the load-bearing mechanism and load-bearing capacity of the joint under two-way loading, we investigated the beam-column joint of a ridged frame viaduct by finite element analysis. The inner radius of axial rebars in the transverse beam affected the load-bearing capacity of the joint, since a compressive strut was formed at the bending inner radius of the bend when the load angle was around 0° . The tie reinforcing bars at in the joint had the effect of increasing the load-bearing capacity by up to 10% in any loading direction. In addition, when the torsional moment of the longitudinal beam was considered, the horizontal force was shared at each fulcrum, but it did not affect the joint bearing force.

キーワード：柱梁接合部，曲げ内半径，帯鉄筋，ねじりモーメント

1. はじめに

ラーメン高架橋やラーメン橋脚などの構造物は、柱と梁が一体的に接続される接合部を有する。鉄道構造物における接合部は、鉄道構造物等設計標準・同解説（コンクリート構造物）第Ⅲ編 コンクリート構造¹⁾（以下、鉄道標準）や配筋の手引き²⁾に従い鉄筋を配置し、ハンチ等を設置することで剛域と仮定し、照査を省略としている。近年の地震被害から、一般的な一層の鉄道ラーメン高架橋では、一部を除き、接合部が大きく損傷した報告はなされていないため、現在の設計手法によることで、接合部は保有すべき耐力を確保できていると考えられる。しかし、二層の高架橋の中層梁と柱の接合部や建築物では、地震の影響により斜めひび割れなどの損傷の発生が報告されている^{3) 4)}。これは、一般的な鉄道ラーメン高架橋の上層梁と柱の接合部に比べて、接合部の寸法が異なることや、スラブの有無等の違いによるものと考えられる。このような接合部の損傷が構造物の性能に与える影響は明確になっておらず、構造物の設計や維持管理において、柱や梁などと同様に、性能を照査できる手法が求められている。

一方、既往の研究^{5) 6) 7)}では、実験および再現解析にて、一方向載荷時におけるL形とT形接合部の耐力と配筋諸元が破壊性状に及ぼす影響を明らかとなっている。ただし、梁の部材軸に沿った載荷方向による検討であり、地震動が斜め方向に作用する場合や、ねじり挙動が生じる不整形な構造物のように、任意の載荷方向や接合部にねじりモーメントが発生する場合に対する耐荷機構や耐

力についても、明確にしておく必要がある。建築分野では、すでに任意の載荷方向による接合部への影響を検討されているが、鉄道構造物では配筋方法が異なる箇所がある。例えば、ラーメン隅角部の外側に沿う軸方向鉄筋の曲げ内半径は、建築物では $3\sim 5\phi$ （ ϕ ：軸方向鉄筋径）とし、鉄道構造物では 10ϕ を基本としている。接合部内の帯鉄筋量については、建築物では接合部におけるせん断力に関する照査で定め、鉄道構造物では構造細目により定めている。

本研究⁸⁾は、任意の載荷方向となる場合や接合部にねじりモーメントが発生する場合に対する耐荷機構や耐力を明らかにすることを目的とした。具体的には、過去に実施^{5) 6) 7)}した有限要素解析を活用しつつ、曲げ内半径の影響等を検証するために、ラーメン高架橋の中央径間における柱と上層梁の接合部を対象とし、載荷方向に角度を持たせることで、載荷角度における接合部のコンクリートの圧縮応力が卓越する圧縮ストラットの形成状況と接合部耐力の関係を検証した。なお、接合部の諸元が耐力に及ぼす影響を検討するため、スラブは考慮せず実施した。また、縦梁と横梁の寸法を同じとすることで、中層梁と柱の接合部にも適用できるようなモデルとした。

2. ラーメン高架橋柱梁接合部の解析概要

2.1 解析モデルの概要

図1に、ラーメン高架橋の柱と上層梁の接合部を模擬した解析モデルを示す。可視化のため、モデル片側のコンクリート要素を非表示としている。なお、解析モデルは、著者らが実験を通して解析の妥当性を検証したL形またはT形接合部のモデル^{5) 6) 7)}（以下、既往のモデル）

* 構造物技術研究部 コンクリート構造研究室

を活用し、部材や鉄筋等を追加することで、図1のモデルを構築した。

解析モデルは、既往のモデルおよび既往の実験と同一の縮尺である、一般的な鉄道ラーメン高架橋の50%程度の寸法とした。配筋は、配筋の手引き²⁾に従って配置した既往のモデルを基本とした。ただし、柱の配筋について、既往のモデルでは実験を模擬しているため、引張および圧縮鉄筋のみ配置されている。本検討では、任意の荷重方向やねじり挙動に対応するために、図1(b)に示すように、柱の外周に沿って同量の軸方向鉄筋を全周に配置した。また、梁の軸方向鉄筋や接合部内の配筋は、配筋の手引き²⁾に従って配置した。なお、横梁と縦梁、柱の長さは、ラーメン高架橋の地震時の柱の曲げモーメント分布の反曲点までの距離を想定して、1800mmに統一した。

コンクリートはソリッド要素とした。鉄筋は離散鉄筋モデルとし、軸方向の剛性のみを考慮したトラス要素とした。なお、軸方向鉄筋の折り曲げ部分は10mm程度の短い直線要素を組合せることで、折り曲げ部分の曲線を再現した。

コンクリートは軟化勾配を考慮し、圧縮側にはParabolicのモデル⁹⁾を、引張側にはHordijkのモデル¹⁰⁾を用いた。コンクリートの破壊エネルギーは、既往文献^{1) 11)}に基づき算定した。また、ひび割れは固定ひび割れモデルを用い、ひび割れ面でのせん断力の伝達については、ひび割れ幅の増加によりひび割れ面でのせん断伝達が低下するAl-Mahaidiのモデル¹²⁾を適用した。

帯鉄筋はバイリニアモデルとした。これは、本研究の目的である接合部の耐力や耐荷機構を明らかにするために、接合部の破壊が先行するように、柱や梁の曲げ降伏を回避することを意図したものである。軸方向鉄筋においては、鉄筋とコンクリートの付着挙動を表現することとし、式(1)に示すように島ら¹³⁾が提案した付着応力すべり関係に α を乗じることとした。

$$\tau_d = \alpha \cdot 0.9 f_c^{2/3} (1 - e^{-40(S/\phi)^{0.6}}) \quad (1)$$

ここに、 τ_d : 付着応力、 f_c : コンクリートの圧縮強度、 S : 鉄筋とコンクリートの相対変位、 ϕ : 鉄筋の直径である。島らの付着応力すべり関係は、マッシブなコンク

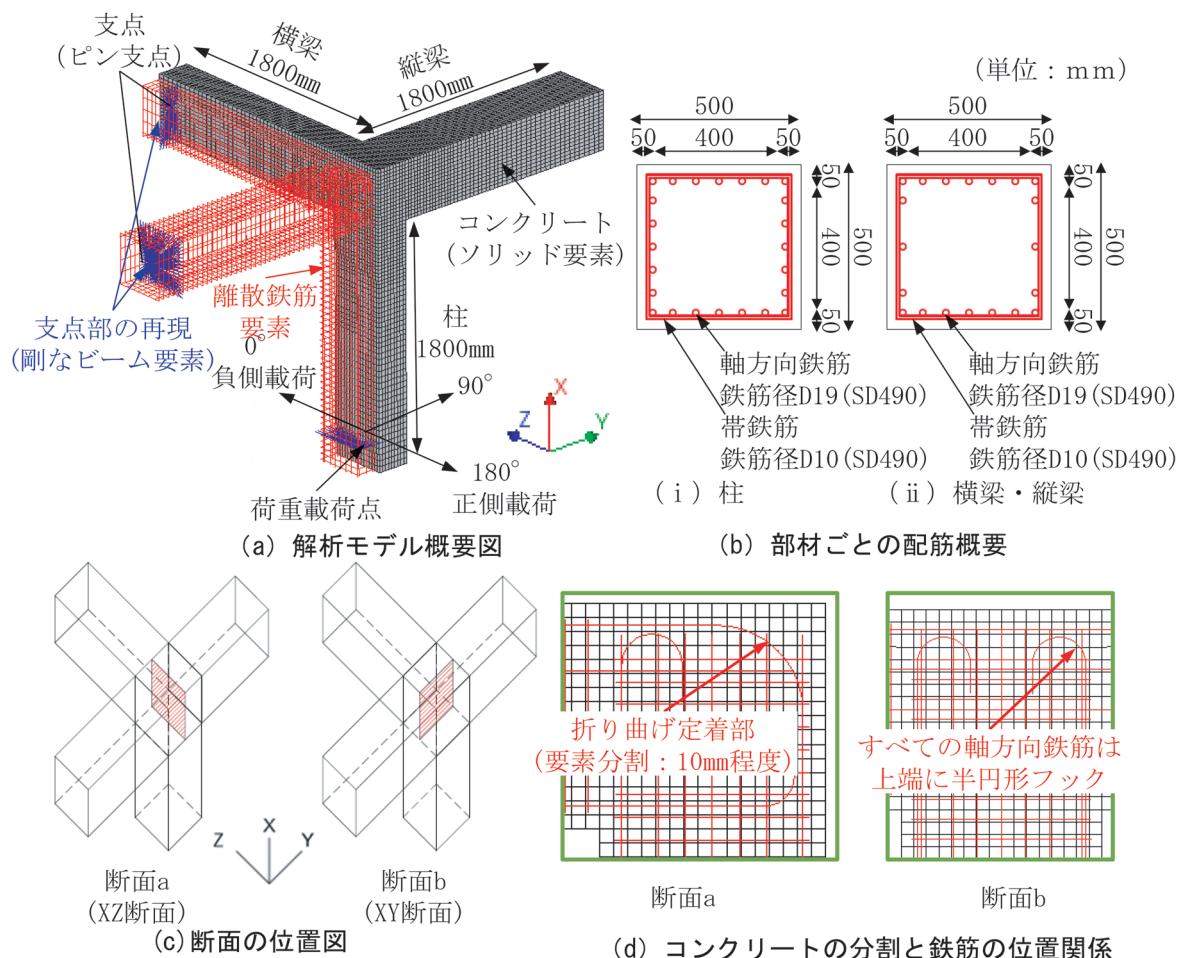


図1 解析モデル図

リートに埋め込まれた異形鉄筋によるものであるが、本研究の軸方向鉄筋のように、周辺のコングリート拘束が小さいことによる影響を考慮するため、既往の研究^{5) 6)}を参考に α を導入し、 $\alpha=0.4$ とした。

コンクリートや鉄筋の材料特性は既往の研究^{5) 6)}と同一とし、コンクリートの圧縮強度は 27N/mm^2 、引張強度は 2.6N/mm^2 、弾性係数は 25.9kN/mm^2 とした。鉄筋の弾性係数は 200kN/mm^2 、帯鉄筋の降伏強度は 345N/mm^2 とした。

境界条件について、部材の軸心位置で荷重点および支点を設定するために、図1(a)に示すように、各部材の端部において、剛なビーム要素を用いて軸心位置に設けた節点と接続した。そして、地震時慣性力等の水平力による曲げモーメントの反曲点が、荷重点および各梁の端部（軸心位置に設けた節点）に位置することを想定し、これらの点でピン支点（全方向変位固定）とした。さらに、地震動が斜め方向に作用する場合やねじり挙動が生じる不整形な構造物において、各部材でねじりモーメントが発生することを想定して、各梁の端部において、回転軸方向のみ拘束することで、梁にねじりモーメントが発生するケースについても検討することとした。

2.2 解析ケース

表1に、解析ケースを示す。荷重する角度は、図1(a)に示す方向で 0° 、 22.5° 、 45° 、 67.5° 、 90° 、 112.5° 、 135° 、 157.5° 、 180° とした。図1(d)に示す横梁軸方向鉄筋の折り曲げ定着部における曲げ内半径（以下、曲げ内半径）の大きさは、 0° 荷重時に接合部の耐力に影響することが確認されている^{5) 6)}。荷重角度に応じて、曲げ内半径が耐力に及ぼす影響の変化を検証するために、全ての荷重角度に対して、曲げ内半径は 3ϕ 、 5ϕ 、 7ϕ 、 10ϕ とした（シリーズ1、2）。

接合部内の帯鉄筋については、 180° 荷重時に接合部の耐力にやや影響があることが明らかにされている^{5) 6)}。荷重角度に応じて、接合部の帯鉄筋が耐力に及ぼす影響の変化を検証するために、全ての荷重角度に対して、接合部の帯鉄筋の有無の影響を検討した（シリーズ1、3）。なお、配置する帯鉄筋量は、柱と同量とした^{1) 2)}。柱の帯鉄筋比 p_w で 0.57% である。

また、梁のねじりモーメントが接合部の耐力や圧縮ストラットの形成に与える影響を検証するため、縦梁と横梁の支点条件において、横梁ではZ軸周りの回転を固定、縦梁ではY軸周りの回転を固定したケースでも検討した（シリーズ4）。

3. 解析結果および各パラメータと接合部耐力の関係

3.1 解析結果の妥当性の検証

図1で構築したモデルは既往の知見をもとに作成しているため、実験結果等がなく、モデルの妥当性を確認する必要がある。そこで、直交梁無で実験結果の再現解析を行っている知見の結果と比較を行い、モデルの妥当性を検証することを目的とした。図2に、荷重方向が 0° 、 180° における、既往の解析結果との曲げ内半径ごとの接合部の耐力の比較を、図3に、曲げ内半径 10ϕ での 0° と 180° 荷重における、既存論文との荷重変位関係の比較を示す。縦梁や軸方向鉄筋の追加による最大水平荷重 $P_{\max}$ の増加は、荷重方向や曲げ内半径の大きさに依存して異なるものと考えられるが、せん断スパン a が大きくなったことによる $P_{\max}$ の減少により、 $P_{\max}$ は既存論文と比較して増減したものと考えられる。なお、剛性の低下

表1 解析ケースとパラメータ一覧

	荷重 角度	曲げ内 半径	接合部の 帯鉄筋	部材の ねじり モーメント
シリーズ1	0° 22.5°	10ϕ ※1	有※2	無
シリーズ2	45° 67.5°	3ϕ 、 5ϕ 、 7ϕ	有※2	無
シリーズ3	90° 112.5° 135°	10ϕ	無	無
シリーズ4	157.5° 180°	10ϕ	有※2	有※3

※1： ϕ は横梁軸方向鉄筋の径

※2：接合部内に柱の帯鉄筋と同量を配置

※3：支点条件にて 横梁はZ軸 直交梁はY軸方向の回転を拘束する

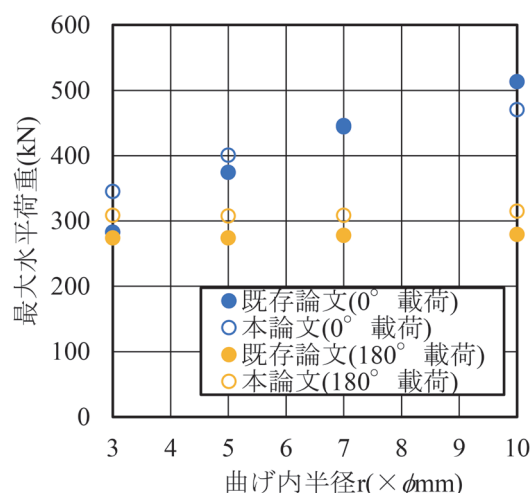


図2 既存論文との最大水平荷重の比較

はせん断スパン a の影響が大きいと考えられる。既往論文は、支点および荷重点から部材基部までの長さは1800mmであるが、曲げモーメントの反曲点から部材基部までの長さ a は1285mmであった⁶⁾。そのため、 a と有効高さ d の比 $a/d=2.86$ となる。本論文は、荷重荷重点から部材基部までの長さ a となるため $a/d=4.00$ となる。

図4に、最小主応力分布で確認した圧縮ストラットの

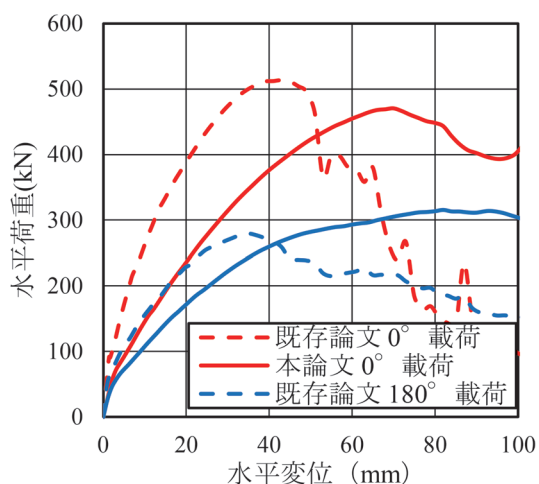


図3 既往論文との荷重変位の比較
(曲げ内半径 10ϕ)

比較を示す。本論文では、図5の模式図のように、圧縮強度の半分程度の 13.5N/mm^2 以下の圧縮応力が発生する箇所を圧縮ストラットと称し、圧縮ストラットが発生した方向に垂直な方向の幅を圧縮ストラット幅と定義する。圧縮ストラット幅に関しては慎重な判断が必要であるが⁵⁾、本論文では圧縮ストラット幅の相対的な評価が目的であるため、このような定義を行った。本論文で定義した圧縮ストラットと圧縮ストラット幅を既往論文と比較すると、圧縮ストラットが発生する位置は同様であるが、圧縮ストラット幅は若干増加していることが確認できる。

既往の実験^{14) 15)}においても、縦梁を設けた場合に耐力が向上しているが破壊形態や耐荷機構には影響がないことが示されている。本解析においても、縦梁を設けた

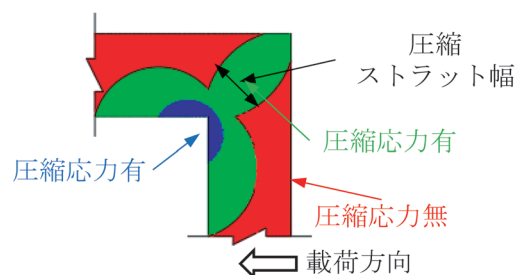


図5 圧縮ストラット模式図

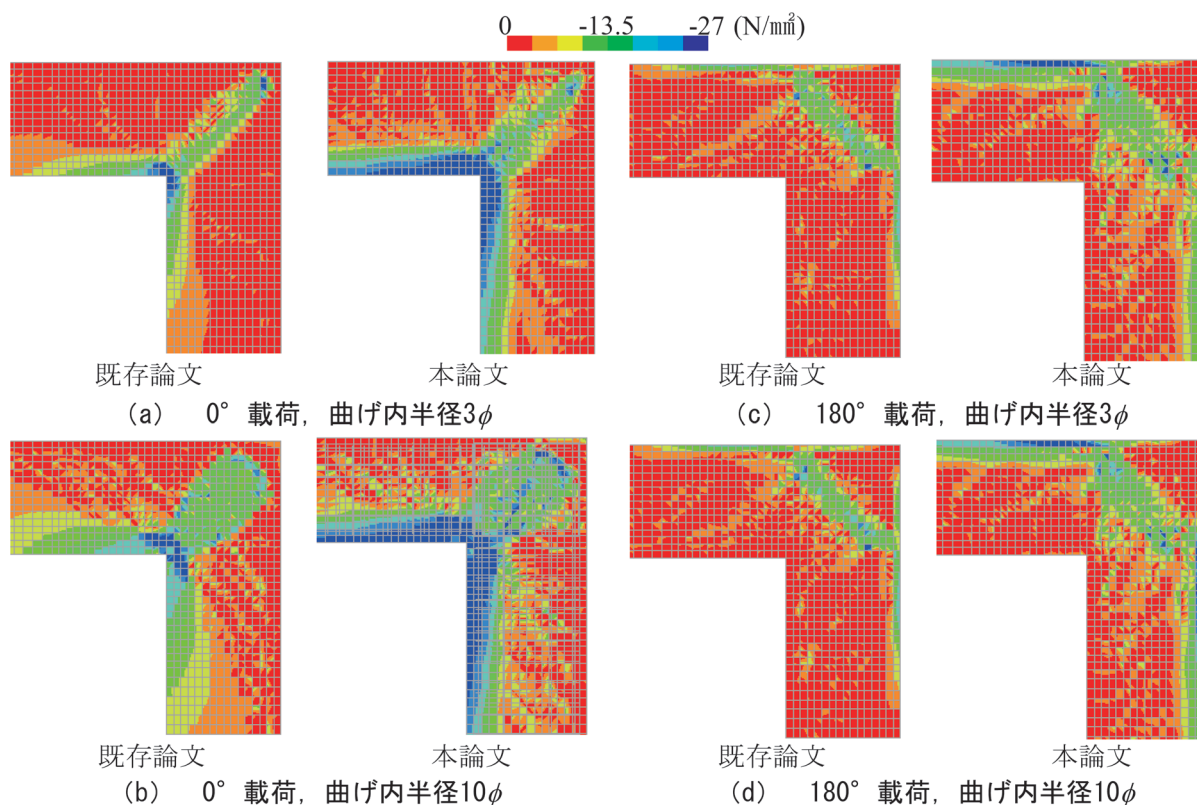


図4 既往論文⁵⁾との圧縮ストラットの比較

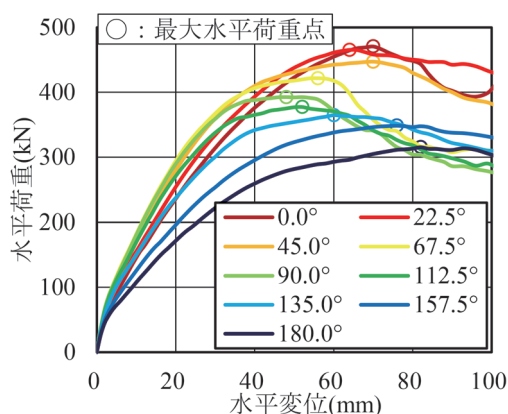


図6 荷重点における荷重—変位関係

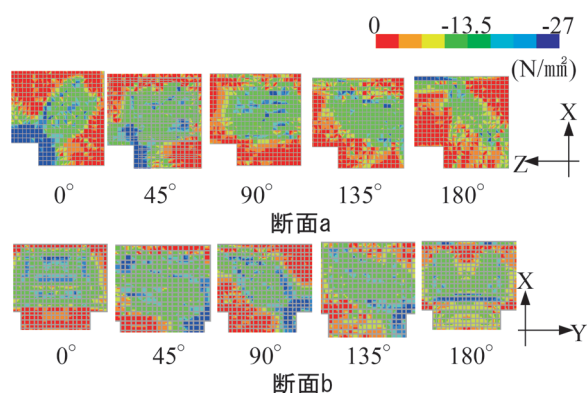


図7 荷重角度ごとの最小主応力図

場合でも既往論文と破壊形態が同様であり、縦梁の追加や接合部の配筋量の増加等により、圧縮ストラット幅や耐力が増加していることから、解析結果は概ね妥当であると判断した。

3.2 荷重角度が接合部の耐力に及ぼす影響

図6に、シリーズ1における各荷重方向における荷重変位関係を示す。横軸の水平変位は荷重荷重位置における変位である。水平荷重の最大値 $P_{\max}$ が最も大きい荷重角度は 0° であり、角度が大きくなるにつれて、 $P_{\max}$ は減少している。 $P_{\max}$ が 180° より 0° のほうが大きいことは、既往の研究^{5) 6)} で確認されている結果と一致している。

図7に、図1(c)におけるシリーズ1の、荷重角度 0° 、 45° 、 90° 、 135° 、 180° の最小主応力分布図を示す。各荷重角度の $P_{\max}$ 時 (図6の○で示す箇所) の最小主応力分布である。いずれの荷重方向に対しても、圧縮ストラットの向きは荷重方向に形成されていることが確認できる。これより、角度が大きくなるにつれて、圧縮ストラットの方法が変化し、圧縮ストラット幅が小さくなっていることが確認できる。

図8は、図7における最小主応力分布から推定した

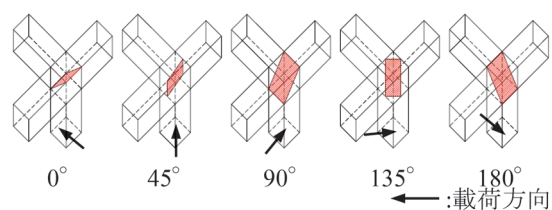


図8 荷重方向ごとの圧縮ストラットのイメージ図

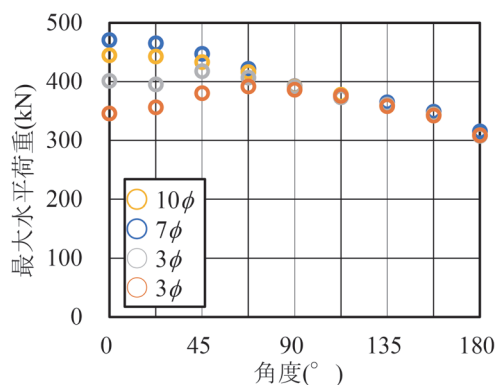


図9 曲げ内半径、角度、 $P_{\max}$ の関係

圧縮ストラットのイメージを図示したものである。圧縮ストラットの方法は荷重方法に依存し、柱と梁の曲げ圧縮縁間で、あるいは曲げ圧縮縁と折り曲げ定着部間で形成されている。また、この圧縮ストラット内の圧縮応力がコンクリートの圧縮強度に達することで、 $P_{\max}$ に達している。すなわち、いずれの荷重方向に対しても、圧縮ストラットは形成され、圧縮ストラット内のコンクリートが圧縮破壊することで、 $P_{\max}$ を示す耐荷機構であることがわかった。以降の検討において、圧縮破壊が生じていると考えられる箇所については、正規化累加ひずみエネルギーに着目して確認する。図7(a)の荷重角度 0° と荷重角度 180° の最小主応力図を比較すると、圧縮ストラット幅が明確に小さくなっていることが確認できる。

以降の検討では、この解析結果をベースにパラメータによる比較を行う。

3.3 曲げ内半径が接合部の耐力に与える影響

図9にシリーズ1, 2における曲げ内半径の大きさに関する荷重角度と荷重点における $P_{\max}$ の関係を、図10に断面a, bにおける最小主応力図を示す。 $0^\circ \sim 90^\circ$ では、曲げ内半径が小さくなると、 $P_{\max}$ が低下することが確認できる。これは曲げ内半径が小さくなることで、圧縮ストラット幅が小さくなり、圧縮ストラット内の曲げ内半径部におけるコンクリートの圧縮破壊が生じやすくなったためと考えられる。

図11に、荷重方向 0° 、曲げ内半径 3ϕ 、 10ϕ での正規化累加ひずみエネルギー分布を示す。正規化累加ひず

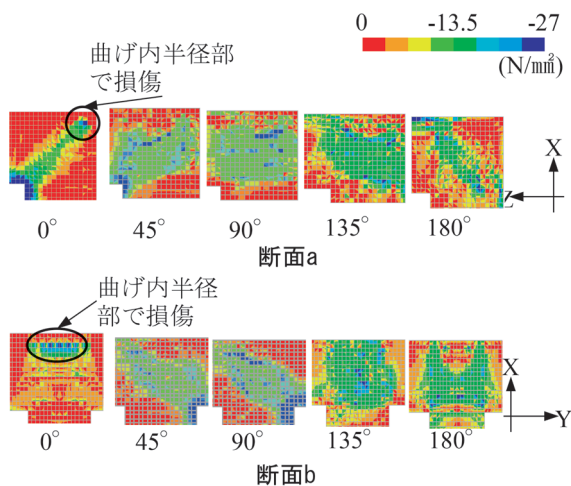


図 10 曲げ内半径 3φにおける最小主応力図

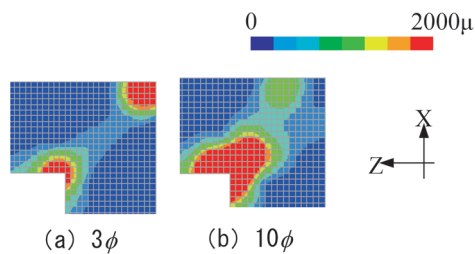


図 11 荷重方向 0°曲げ半径 3φ, 10φでの正規化累加ひずみエネルギー分布

みエネルギーは、土木学会コンクリート標準示方書（設計編）¹⁶⁾に示される材料の損傷指標であり、コンクリートの圧縮破壊を表す指標である。この損傷指標は、重みつき平均をとることで損傷指標に対する要素分割依存性を低減することが齊藤¹⁷⁾らによって示されている。曲げ内半径が3φでは、軸方向鉄筋の曲げ内半径部で正規化累加ひずみエネルギーが大きくなり、限界値である1500μを超過していることが確認できる。また、図10に示した断面a, bにおける0°, 45°の結果からわかるように、荷重方向が0°では、圧縮ストラットは曲げ内半径部で形成されるため曲げ内半径の影響が大きい。90°までは、荷重角度が大きくなると、曲げ内半径部で圧縮ストラットが形成されにくくなり、曲げ内半径部でのコンクリートの圧縮応力が小さくなるため、曲げ内半径の大きさが P_{max} に及ぼす影響は小さくなる。荷重方向が90°~180°では、圧縮ストラットが曲げ内半径部で形成されなくなるため、曲げ内半径の大きさに関わらず、圧縮ストラット幅に顕著な違いはみられなくなり、 P_{max} に違いはほとんど生じない結果になったと考えられる。

3.4 接合部内帯鉄筋が接合部の耐力に及ぼす影響

図12にシリーズ1, 3における接合部の帯鉄筋の有無に関する荷重角度と荷重点における P_{max} の関係を、

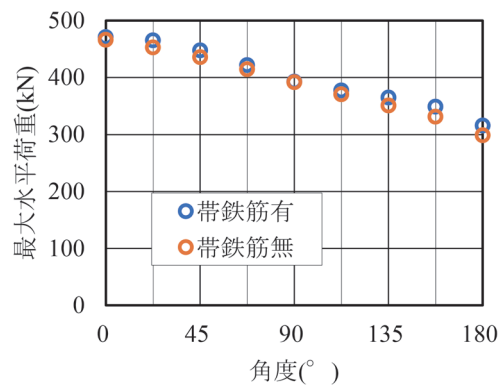


図 12 帯鉄筋の有無と P_{max} の関係

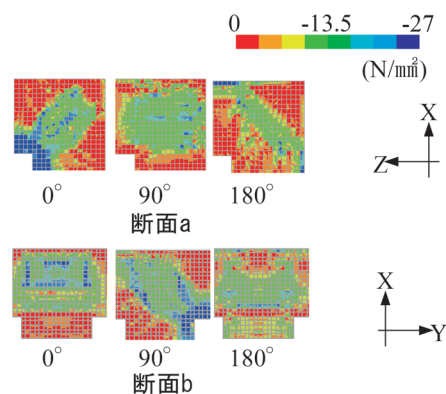


図 13 シリーズ3の最小主応力図

図13に荷重角度0°, 90°, 180°における最小主応力分布図を示す。いずれの荷重角度に対しても、接合部の帯鉄筋が P_{max} に及ぼす影響は小さいことが確認できる。図7と図13の荷重方向0°, 90°の各断面a, bの最小主応力分布を比較すると、帯鉄筋の有無で圧縮ストラット幅に大きな違いはないため、 P_{max} に与える影響は小さかったと考えられる。荷重方向が90°~180°では、180°に近づく、帯鉄筋の有無により P_{max} の差は大きくなる傾向がある。荷重方向が180°の場合での最小主応力は、帯鉄筋を配置することで、図7の荷重方向180°の最小主応力と比較すると、若干ではあるが圧縮ストラットの幅が広がっていることが確認できる。この幅の差が耐力の差につながっていると考えられる。

3.5 ねじりモーメントが接合部の耐力に及ぼす影響

図14にシリーズ4における各部材のねじりモーメントの有無に関する荷重角度と荷重点における P_{max} の関係を、図15に荷重角度0°, 90°, 180°における最小主応力図を示す。図9の曲げ内半径3φ, 10φの結果と比較すると、いずれの荷重方向に対しても、直交梁のねじりモーメントを考慮した場合、 P_{max} が増加していることが確認できる。90°から荷重角度が大きくなる、または小さくなると、 P_{max} の差が顕著となっている。その差は、

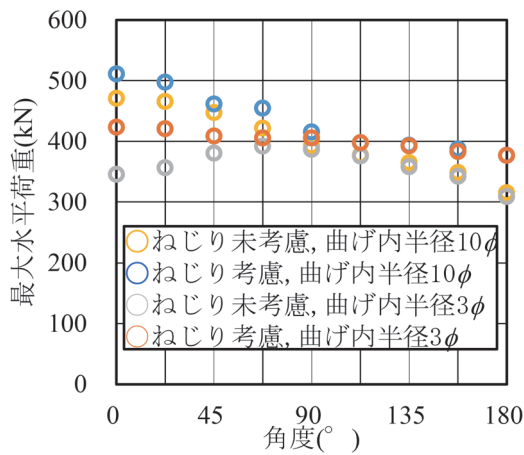


図 14 ねじりモーメントの有無と $P_{\max}$ の関係

0° 載荷で 1 割, 180° 載荷で 2 割程度であった。なお, 0° ~ 90° の載荷時では, 図 15 に示す通り, ねじりモーメントを有する場合でも, 圧縮ストラットが曲げ内半径部で形成されるため, 曲げ内半径が小さくなると $P_{\max}$ が小さくなることを確認できる。図 16, 17 に, 各方向の $P_{\max}$ の比較を示す。図中には, 解析で得られたねじりモーメントの有無による $P_{\max}$ と, ねじりモーメントを考慮した際の支点反力を差分として除去したものを併記した。

接合部にねじりモーメントが発生する場合における, 各載荷方向の $P_{\max}$ は, ねじりモーメントが発生しない場合よりもやや大きくなる。この $P_{\max}$ の差は, ねじりモーメントが発生する場合のねじりモーメントの各支点反力と $P_{\max}$ の差分と概ね一致した。すなわち, 接合部の耐力には, ねじりモーメントの影響は小さいことがわかった。

4. 2 方向載荷を受ける接合部の耐力の相関関係

図 18 に, 2 方向載荷を受ける接合部の耐力の相関関係を示す。図のプロットは, 各解析の $P_{\max}$ 時における, Y 軸または Z 軸方向の水平力成分 V_{yi} , V_{zi} を算定し, 0° (180°) または 90° 載荷時での水平力で除して正規化したものである。また, 図中の破線は, 円弧の二軸相関曲線を示しており, 文献¹⁸⁾ で示される接合部の 2 方向入力に対する設計では, 2 方向入力時の水平荷重 (せん断力) が, この円の内部に位置することを確認することとしている。載荷方向が 0° ~ 90° では, $P_{\max}$ への影響が大きい曲げ内半径を変化させた結果についても, 概ねこの円に沿ってプロットされている。載荷方向が 90° ~ 180° においても, いずれのパラメータに対しても, 概ねこの円に沿ってプロットされている。すなわち, 鉄道構造物における柱や梁の諸元も含めた条件下では, 既往文献と同様に曲げ内半径の大きさや接合部の帯鉄筋の有無, 部

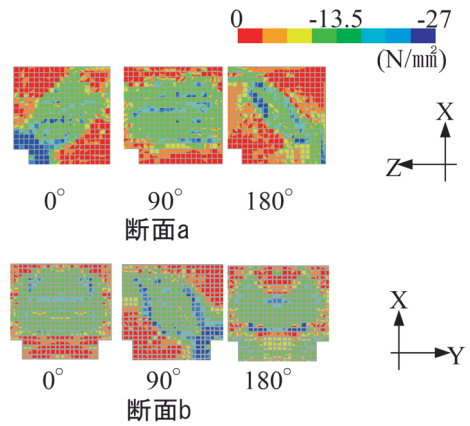


図 15 ねじりモーメントを考慮した最小主応力図

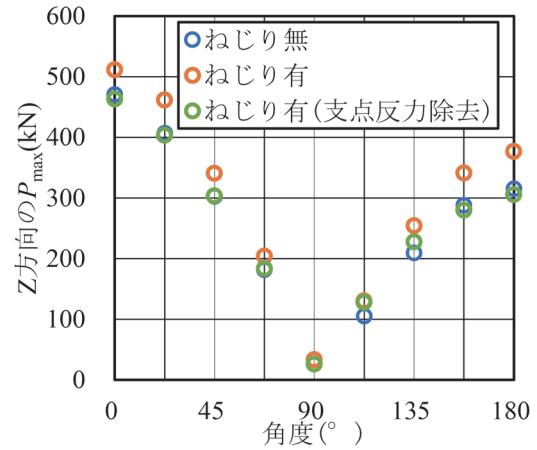


図 16 差分を考慮した Z 方向最大水平荷重の比較

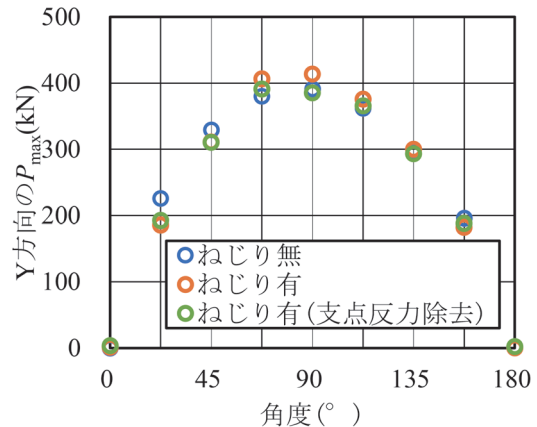
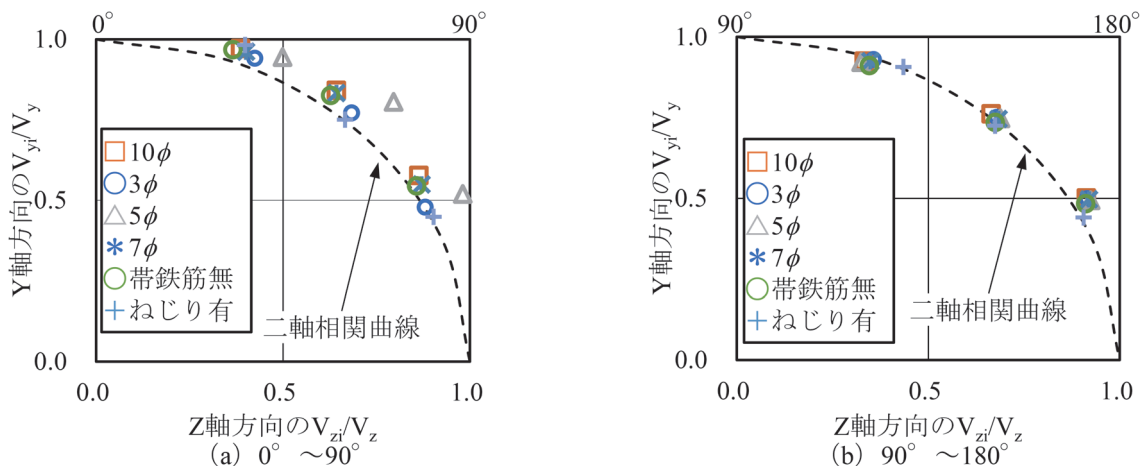


図 17 差分を考慮した Y 方向最大水平荷重の比較

材のねじりモーメントの有無に大きさに関わらず, 各載荷角度における水平成分は大きくは変化しないことがわかった。



V_z : 0° 荷重時(Z軸方向)におけるZ軸方向の水平力
 V_y : 90° 荷重時(Y軸方向)におけるY軸方向の水平力
 V_{yi}, V_{zi} : 各荷重方向時におけるY軸またはZ軸方向の水平力成分

図 18 各荷重角度での接合部最大水平力相関関係

5. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 2方向荷重時では、圧縮ストラットの向きは荷重方向に形成されること、接合部が閉じる側から開く側の角度になるほど圧縮ストラットの幅が小さくなるため、水平荷重の最大値 $P_{\max}$ が低下することを明らかにした。
- (2) 接合部が閉じる側の荷重角度では、圧縮ストラットが曲げ内半径部に向かって形成されるため、曲げ内半径の大きさが $P_{\max}$ に影響を与えるが、接合部が開く側の荷重角度ではその影響は無くなることを明らかにした。
- (3) 帯鉄筋の効果は接合部が開く側で幾分大きくなる傾向にはあったものの、角度によらず圧縮ストラットの幅や耐力に及ぼす影響は小さいことを明らかにした。
- (4) 部材にねじりモーメントが発生する場合、支点反力の増加によって $P_{\max}$ は大きくなるが、耐荷機構や破壊形態に変化がないため、接合部の耐力には大きな影響が無いことを明らかにした。
- (5) 鉄道構造物における柱梁接合部の配筋を用いた場合でも、2方向荷重時の各方向に対する接合部の耐力の相関関係は、曲げ内半径や帯鉄筋、直交梁のねじりモーメントの有無に関わらず、各荷重角度における水平成分は大きくは変化しないことがわかった。

本稿では柱梁接合部の諸元や、荷重角度によって接合部の耐力が異なることを明らかにした。特に、不整形ラー

メン高架橋等、複雑な作用を受ける場合は、接合部の仕様によって、耐力が異なるため配筋の仕様を満足するだけでなく、有限要素解析等で耐荷機構を確認する必要がある。

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（コンクリート構造物）第III編 コンクリート構造，丸善出版，2023
- 2) 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 コンクリート構造物 配筋の手引き，丸善出版，2004
- 3) 東日本旅客鉄道：東北地方太平洋沖地震と鉄道構造物，SED，第37号，2011
- 4) 建設省建築研究所：平成7年兵庫県南部地震被害調査中間報告書，1995
- 5) 草野浩之，中田裕喜，田所敏弥，幸良淳志：L型柱梁接合部における圧縮ストラットの形成と耐力に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.41，No2，pp.325-330，2019
- 6) 草野浩之，中田裕喜，田所敏弥，安保知紀：接合部内の配筋諸元がL形RC柱梁接合部の破壊性状に及ぼす影響，第15回日本地震工学シンポジウム，pp.51-60，2018
- 7) 西村脩平，中田裕喜，渡辺健，田所敏弥，安保知紀：柱と梁の断面高さが等しいT形柱梁接合部の損傷過程および解析による評価の検討，土木学会全国大会第75回年次学術講演会，V-602，2020
- 8) 小西亮太，中田裕喜，渡辺健：ラーメン高架橋柱梁接合部における2方向水平力が作用した場合の圧縮ストラットと

- 耐力に関する解析的評価, 構造工学論文集, Vol.70A, pp.877-884, 2024
- 9) Feenstra, P.H.: Computational Aspect of Biaxial Stress in Plain and reinforced Concrete, PhD thesis, Delft University of Technology, 1993.
- 10) Hordijk, D. A.: Local Approach to Fatigue of Concrete, PhD thesis, Delft University of Technology, 1991.
- 11) Nakamura, H. and Higai, T.: Compressive fracture energy and fracture zone length of concrete, Seminar on post-peak behavior RC structure subjected to seismic load, JCI-C51E, Vol.2, pp.259-272, 1999.
- 12) Al- Mahaidi, R.S.H.: Nonlinear Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Deep Members, Tech. Rep.79-1, Department of Structural Engineering, Cornell University, 1979.
- 13) 島弘, 周礼良, 岡村甫: マッシブなコンクリートに埋め込まれた異形鉄筋の付着応力—すべり—ひずみ関係, 土木学会論文集, 第 378号/V-6, pp.165-174, 1987
- 14) 石田健吾, 島晃平, 東健二, 藤井栄: 鉄筋コンクリート十字型柱梁接合部の実大実験, コンクリート工学会年次論文集, Vol.23, No.3, pp.343-348, 2001
- 15) 島晃平, 石田健吾, 佐藤裕一, 藤井栄: 実大実験結果に基づく接合部の損傷評価と寸法効果に関する考察, コンクリート工学会年次論文集, Vol.23, No.3, pp.349-354, 2001
- 16) 土木学会: 2022 年制定 コンクリート標準示方書 (設計編), 2023
- 17) 斉藤成彦, 牧剛史, 土屋智史, 渡邊忠朋: 非線形有限要素解析による RC はり部材の損傷評価, 土木学会論文集 E2, Vol.67, No.2, pp.166-180, 2011
- 18) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説, 丸善出版, 1999

線路周辺画像解析エンジンの 暗所画像への適用

清水 惇* 箕浦 慎太郎**

Application of Image Analysis Engine around Railway Track to Night Vision Images

Atsushi SHIMIZU Shintaro MINOURA

We developed a method for capturing and analyzing images using images captured at night by a stereo camera. We also verified the feasibility of using the developed methods for platform limit measurement and difference detection of the environment around railway. The result confirmed that by combining infrared light projectors with different irradiation angles and irradiation distances, it is possible to capture a clear image of the rail periphery while capturing the general shape of the image as a whole. We also developed a method for measuring the distances around the platform and examined the measurement accuracy. The average error was less than 20 mm. Furthermore, by setting appropriate parameters, we confirmed that the difference detection can be properly performed even for night vision images.

キーワード：画像解析，暗所，3次元点群，ホーム限界，差分検知，近赤外線

1. はじめに

鉄道事業者は、各社の規程等で定められた検査周期、時期、項目等に基づき線路等の検査を実施しているが、これら検査の大半は人が現地に赴いて行われており、鉄道車両の走行安全性を確保しながら人的負担を軽減するシステムの導入が求められている。このような背景から、近年技術の進歩が目覚ましい画像解析技術を活用し、線路検査に関わる業務を自動的に行うことができるシステムを導入するための技術開発を進めている¹⁾。これまで、検査員が列車に添乗し、線路周辺を目視で確認することにより実施している列車巡視業務に対し、画像解析技術を活用することでその業務を支援する列車巡視支援システムと、このシステムのコアとなる線路周辺画像解析エンジン（以下、「本エンジン」という）の開発を進めてきた。本エンジンは、営業列車前頭に搭載したステレオカメラを用いて撮影した線路周辺の画像（以下、「列車前頭画像」という）を解析することで、建築限界を支障する物体を検知する建築限界支障物検知と、異なる2時期に撮影された画像の差分を検知することで線路周辺の環境変化を抽出する差分検知の2つの機能から構成される。一方、これらの画像解析技術は、昼間の明かり区間での撮影画像を適用対象に開発を進めてきたため、夜間やトンネル内での撮影画像（暗所画像）は適用の対象外であり、撮影可能な時間帯や区間に制約があった。暗

所画像でも画像解析が可能になれば、列車巡視支援システムの運用の幅が広がり、本システムの実用性を一段と高めることができると考えられる。

そこで、本報告では、列車前頭ステレオカメラを用いた夜間の撮影により、建築限界支障や線路周辺における環境変化の検知を可能とするため、新たに開発した撮影手法および画像解析手法を用いて、ホーム限界測定や差分検知の活用可能性を検証した結果を述べる。

2. 線路周辺画像解析エンジンの概要

本エンジンは、営業列車前頭に設置したステレオカメラで撮影した画像を用いることにより、「建築限界等内の支障物検知」と「2時期画像の差分検知」が可能である。本章ではそれぞれの機能について概要を示す。

2.1 多視点ステレオによる建築限界等内の支障物検知

本エンジンにおける支障物検知では、複数枚の画像を使用して高密度かつ高精度な3次元の空間情報（3次元点群）を復元する、多視点ステレオと呼ばれる手法を用いている。本手法により復元した3次元点群を活用し、点群内に建築限界等に相当する枠を設定することで、その枠内にある物体を支障物として検知する。

多視点ステレオにおいては、3次元点群の復元精度に直結するカメラの位置や姿勢の経時変化を、自己位置推定技術と呼ばれる、画像データのみから高精度に推定する手法を用いて算出している。

* 軌道技術研究部 軌道管理研究室

** 鉄道力学研究部 軌道力学研究室

2.2 異なる時期に撮影した画像の差分検知

本エンジンで差分検知の対象とする画像については、異なる時期に撮影した画像から、同じキロ程で撮影した画像同士を対応付ける必要がある。そこで、ある時期に撮影された画像の各フレームに対して、別の時期に撮影された基準画像の全フレームの中から、撮影キロ程が最も近いフレームを探索する。それでも、走行する列車上から撮影されるため、シャッタータイミングは走行ごとに異なり、完全に同じキロ程で撮影された画像フレームを得ることはできず、比較する2枚の画像フレーム間で対象物の見え方がわずかに変化する。さらに、撮影時期の違いにより日照条件等も変化的ることから、これらを補正するため、比較する2つの画像間で画像上の幾何配置や輝度を近付ける方法（輝度正規化）を行う。

なお、線路周辺の自動車や歩行者、また木々の揺らめき等、管理上不要な差分については、深層学習モデルによって画像上の被写体の種類をピクセル単位で識別して検知対象外とすることが可能となっている。

3. 暗所での撮影手法と画像鮮明化手法の開発

列車前頭ステレオカメラを用いた夜間やトンネル内の撮影画像に対し、2章で示した既往の研究で開発した画像解析技術に適用するための、撮影手法と画像鮮明化手法を開発した。本章では、開発したこれら手法の詳細を示す。

3.1 近赤外線投光器を用いた暗所撮影手法

暗所における撮影手法として、近赤外線を用いた撮影方法を採用した。この方法は、人の目に見えない近赤外線を照射し、デジタルカメラで通常使用されている赤外線カットフィルタを外して撮影するものであり、可視光による照明が敬遠される夜間の住宅地や施設内でも高視認画像の撮影が可能な方法として知られる²⁾。なお、赤外線を照射して撮影するため、色の情報を含んだ撮影はできないが、白黒画像に近い形で鮮明な画像を取得することができる。

昼間撮影を対象に開発した列車巡視支援システムで使用しているデジタルカメラは、可視光の波長帯域をくまなく捉えることができるように赤外線に対しても感度を有しており、赤外線カットフィルタの取り外しが可能なことから、昼間撮影と同じステレオカメラを用いて撮影を行うこととした。続いて、列車前頭への近赤外線投光器の配置方法を検討した。図1に、適切と考えられる配置で投光器を設置した状況を、表1に近赤外線投光器のスペックを示す。拡散型投光器を照射することで撮影シーン全体の概形を捉えつつ、撮影シーン中心部にはスポット型投光器を照射することで、レールやトンネル壁

面に対して、より視認性の高い画像の取得を目指した配置となっている。

3.2 暗所画像鮮明化手法

3.1節に示した撮影方法を用いれば、夜間やトンネル内においても、視認性がある程度よい画像が取得できると考えられるが、それでも日中撮影した画像と比べると、コントラストが低く、視認性が悪い。また、投光器の光の当たり方は1枚の画像の中で均一ではなく、被写体の照明の当たり方にむらが生じる。このような暗所画像の特徴は、画像解析処理における精度悪化の要因であり、ひいては画像解析処理を適用した結果の検知誤差の要因となる。そこで、暗所撮影ステレオ画像を、昼間撮影を対象に開発した画像解析に適した形式となるように、鮮明化する画像解析手法を開発した。

本手法は、2つの処理によって構成される。1つ目は、「照明均一化処理」である。暗所撮影画像に見られる、コントラストが低く、また照明範囲が限定的であることから同一画像内のコントラストが不均一であるといった問題を解消するため、画像の特定位置の画素値から照明の当たり方を推定し、全体の照明の当たり方を正規化する。本処理により、画像が黒つぶれあるいは白飛びしていない限りは、不鮮明箇所の視認性をあげることが可能

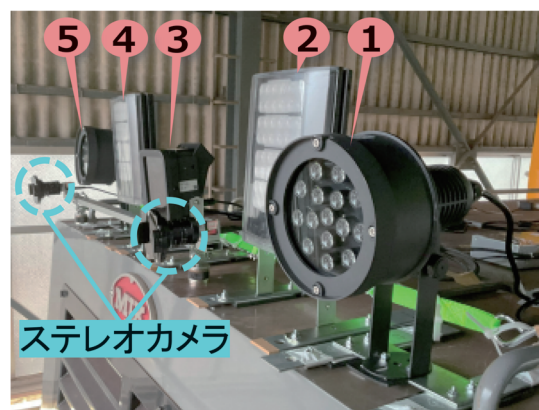


図1 近赤外線投光器とステレオカメラの設置状況

表1 近赤外線投光器のスペック

図1中の 番号：	②④	③	①	⑤
特徴：	拡散型	スポット型	中間型 A	中間型 B
照射 角度：	120 度	30 度	60 度	40 度
照射 距離：	65m	200m	120m	180m
寸法：	W180×H280 ×D80 [mm]	W130 ×H170 ×D100 [mm]	直径 157× D228 [mm]	直径 157× D228 [mm]

である。

2つ目は、「デノイズ処理」である。撮影時に光量が少なく暗所であるほど、センサに起因するノイズの大きさが信号の大きさと比較して大きくなるため、画像上のノイズが強調される。さらに、上記の「照明均一化処理」を施すと、このノイズがさらに強調され、3次元復元の処理時にノイズ部が誤って復元される可能性が高くなる。これを防ぐため、画像上のエッジ（物体の輪郭）等の情報は保存しながら、画像の平滑化を行ってノイズを除去する。

図2に、開発した暗所画像鮮明化を適用した結果を示す。本処理を適用することで、画像上のコントラストの低さや不均一さが解消され、画像上の物体の形状の視認性が向上していることがわかる。

4. ホーム限界測定への適用可能性の検討

ホームの限界支障は巡視や目視で確認できないため、専用の機械により測定している事業者が多い。既往の研究¹⁾では、昼間画像から生成した3次元点群空間において、ホーム限界の測定精度を調べた結果、平均誤差は約15mmであることがわかっている。夜間においても、列車前頭ステレオ撮影で生成される点群をホーム限界測定に活用できれば、軌道検査のさらなる効率化が期待できる。そこで、暗所画像からホーム限界を測定する手法について検討した³⁾。

4.1 検討方法

本検討では、暗所画像と昼間画像の比較を行った。撮影時のフレームレートは夜間と昼間ともに30fpsで、夜間撮影において装置を取り付けた保守用車の走行速度は10～20km/hとし、昼間は営業列車の通常走行速度（駅停車のため10～40km/h程度）により撮影した。

続いて、撮影画像より生成した3次元点群から、線路の2次元断面データを算出する方法を構築した。そして、ホームの離れおよび高さの距離を算出した結果に対して、同日現場で専用の機材を用いて測定した実測値と比較することで3次元点群を用いた測定精度を調べた。

4.1.1 測定点のラベル付け

図3に示すように、生成された3次元点群上において、現場に印づけられたホーム離れ・高さの測定点を確認し、点群にラベル付けを行う。なお、生成状況により色情報が失われて3次元点群上で測定点を確認できない箇所に対しては、確認できた測定点からの距離に応じてラベル付けを行った。

4.1.2 線路断面点群の抽出

3次元点群は3次元空間内に同じ密度で存在していないことから、ある断面（キロ程）では例えばホームの一



(a) 適用前（元画像）



(b) 適用後

図2 暗所画像鮮明化手法

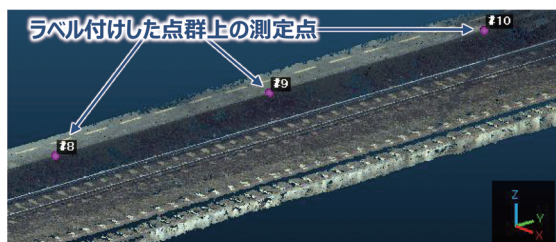


図3 測定点のラベル付け

部が点と点の間となり、正しい形状を取得できない可能性がある。そこで、図4に示すように、ラベル付けした各測定点のレール長手方向の座標から、線路断面に相当する点群を抽出する。本検討においては、断面の厚さを1.0m（測定点のレール長手方向の座標から前後0.5m）とした。また、点群処理ソフトウェアで抽出した線路断面点群の目視確認を行い、測定に不要な点や明らかに誤って復元された点を選択・削除した。

4.1.3 2次元断面データの作成

4.1.2項で抽出した線路断面点群は、断面の厚さ内で鉛直方向にばらつきを持った点群の集合であることから、図5に示すように、レール頭頂面やまくらぎ表面と同一の水平方向に一定間隔で区切って、各範囲内の鉛直座標の代表値で表される2次元断面データを作成する。本検討においては、1mm間隔で区切り、中央値を代表



(a) 抽出前



(b) 抽出後

図4 線路断面点群の抽出

値とした。

4.1.4 ホーム限界（離れ・高さ）の距離測定

4.1.3 項で作成した2次元断面データから、ホーム端とホーム反対側にあるレールに相当する点を選択し、その鉛直および水平座標から、ホームの離れ・高さの距離を算出する。ホーム離れは、軌道中心線を基準とする値に換算するため、本検討においては、ホーム端とレールの座標より測定される離れ距離から、軌間設計値（1067mm）の半分の値を差し引いた。

なお、図4、図5は昼間画像から作成した3次元点群（以下、昼間点群）による処理結果を示しているが、夜間画像から作成した3次元点群（以下、夜間点群）に対しても同様の処理を行った。また、夜間点群は、「近赤外線投光器のみ」を照射して撮影した画像から作成した点群（夜間点群A）と、「近赤外線投光器とモーターの前照灯の両方」を通常照射して撮影した画像から作成した点群（夜間点群B）の2パターンで検討した。

4.2 検討結果

図6に各断面におけるホーム離れ・高さの実測値と点群からの測定値を、表2に点群からの測定値の実測値に対する誤差を示す。なお、3次元点群による線路断面の抽出では一定の厚さ（ここでは1.0m）を抽出して求めているため、算出値には抽出した厚さ内におけるホームの実際の変化量が誤差に含まれると考えられる。

これらの結果より、昼間画像および夜間画像A、Bのいずれにおいても、点群からの測定値はホーム離れ・高さの実測値を概ね捉えており、表2より、平均誤差は昼間点群で概ね10mm、夜間点群でA、Bのいずれにおい

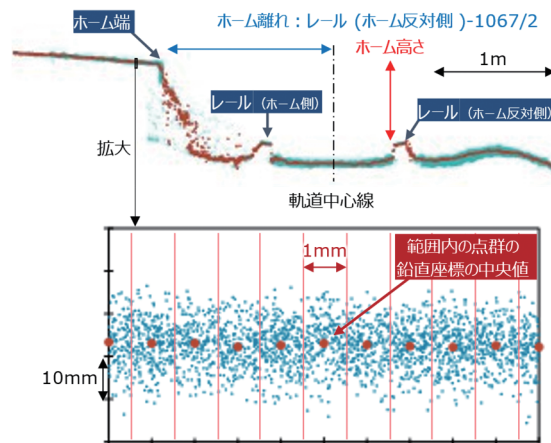
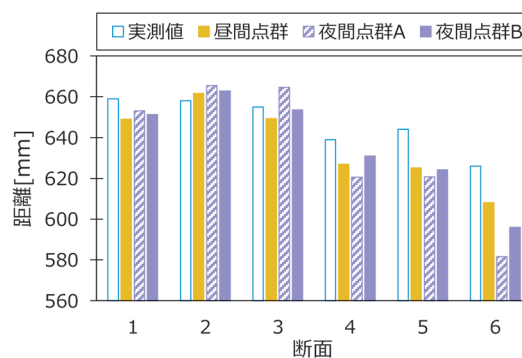
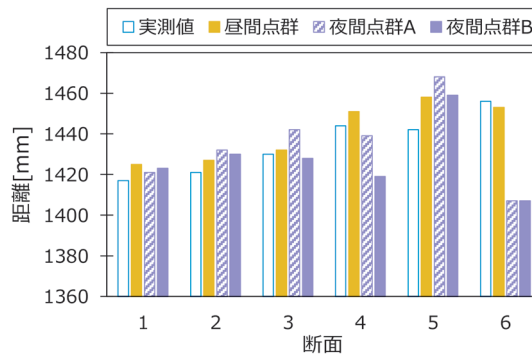


図5 線路断面点群の2次元プロット（水色）と2次元断面データ（赤色）



(a) ホーム高さ



(b) ホーム離れ

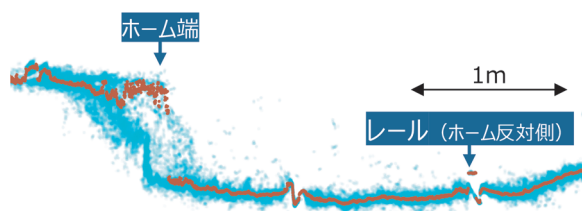
図6 実測値と点群による測定値の比較

ても20mm未満であった。最大誤差は昼間点群で18mm、夜間点群でA、Bのいずれにおいても最大で49mmであった。ここで、図7に、最大の誤差が見られた夜間点群Aの断面6における2次元断面データと線路断面点群を示す。同図より3次元点群においてホーム端の断面形状の復元にノイズが多く含まれていることがわかる。これは、画像上で特徴点が少なくかつ輝度値が近いホーム上の平面やホーム下の隅角部において、空間を埋めるように誤って点群が復元されるためであると考

以上の結果から、夜間画像から作成した3次元点群による距離測定は、昼間画像に比べると実測値との誤差が大きくなる場合があるが、実測値の傾向は捉えることが可能であるといえる。そのため、今回行ったホーム離れ・高さ測定等の検査において、要注意箇所のスクリーニング等へ活用できると考えられる。

近赤外線を用いて、夜間およびトンネルのほか、構造物により日光が遮断された駅や基地、地下鉄道等で撮影した画像に対して、２時期画像の差分検知の画像解析技術が適用できれば、列車巡視支援システムの運用の幅が

断面	高さ			離れ		
	昼間 点群	夜間 点群 A	夜間 点群 B	昼間 点群	夜間 点群 A	夜間 点群 B
1	-10	-6	-8	8	4	6
2	4	7	5	6	11	9
3	-6	10	-1	2	12	-2
4	-12	-18	-8	7	-5	-25
5	-19	-23	-20	16	26	17
6	-18	-44	-30	-3	-49	-49
絶対値の 平均	11	18	12	7	18	18



A photograph of a railway track curving through a dark, wooded area. A speed limit sign is visible on the left side of the track, showing '65', '80', and 'P'. The track is made of wooden sleepers and metal rails, and the surrounding area is heavily forested.

図8 障害物を設置した状態における撮影画像

図9に、地点①トンネル内における画像に対して差分検知を適用した結果をパラメータ条件別に示す。「輝度正規化あり」の結果を見ると、いずれの感度パラメータを用いても、障害物の有無を検知できていない。これに対して、「輝度正規化なし」の結果は、「感度強」では、障害物の有無を含む画像の大半を誤って検知（過検知）しているが、「感度中」、「感度弱」においては、目立った過検知が発生せずに障害物の有無が検知されていることがわかる。暗所撮影画像は昼間画像と比べて色みに関

		差分検知の感度		
		強	中	弱
輝度正規化	あり			
	なし			

図9 地点①トンネル内における差分検知結果（赤い領域は差分検知箇所、青い領域は検知対象外を表す）

表3 差分検知結果の判定一覧

パラメータ		検知の有無		
輝度正規化	感度	地点①	地点②	地点③
あり	強	検知できず	検知	過検知
	中	検知できず	検知できず	検知できず
	弱	検知できず	検知できず	検知できず
なし	強	過検知	過検知	過検知
	中	検知	やや過検知	やや過検知
	弱	検知	検知	検知

する情報が少なく、画像における輝度の寄与が相対的に高くなるため、昼間の撮影画像に対して適用することを想定して作られた輝度正規化処理を暗所画像に対して施すと、同処理が過剰に働くことによって2時期画像間の差分を検知できなかったと考えられる。

続いて、表3に、本検討の各照明条件・地点別の差分検知結果の判定一覧を示す。これは、各地点で取得した暗所画像のペアに対し、パラメータを変動させて差分検知プログラムに適用した結果を示したものである。同表より、昼間画像に対して通常用いる「輝度正規化あり」のパラメータを暗所画像に用いると、感度パラメータをどのように設定しても、ほとんどのケースで障害物を検知できないか過検知する結果となった。一方で、「輝度正規化なし」とすると、特に「感度弱」において良好な結果が得られた。

このように、暗所画像に対しても、適切にパラメータを設定することで差分検知できることがわかった。よっ

て、夜間やトンネル内等の場面においても、近赤外線を用いて暗所撮影をすることで、差分検知を有効に活用して線路周辺環境を把握できると考えられる。

6. まとめ

列車前頭ステレオカメラを用いた夜間の撮影により、建築限界支障や線路周辺における環境変化の検知を可能とするため、撮影手法および画像解析手法を開発した。また、開発した手法を用いて、ホーム限界測定や差分検知の活用可能性を検証した。得られた知見は以下のとおりである。

- (1) 画像解析に適用する画像を暗所でも取得可能とするために、照射角度や照射距離が異なる近赤外線投光器を組み合わせ、トンネル壁面等の画像全体の概形は捉えつつ、画像解析による寸法測定の基準となるレール周辺を鮮明に撮影する方法を開

発した。

- (2) 開発した暗所撮影方法により得られる3次元点群データから、線路の2次元断面を算出し、ホーム離れ・高さの距離を測定する方法を構築した。夜間の列車前頭画像で生成した3次元点群からホーム離れ・高さの距離の測定精度を調べた結果、平均誤差は20mm未満であった。
- (3) 撮影した暗所画像を差分検知プログラムに適用して、線路周辺に設置した障害物の有無を検知できるか調べた。その結果、昼間画像に用いると良好な結果が得られる輝度正規化処理をせず、また、昼間画像よりも検知感度を弱くすることで、暗所画像に対しても適切に差分検知できることを確認した。

本研究の一部は、国土交通省の鉄道技術開発費補助金を受けて実施した。

文 献

- 1) 昆野修平，川崎恭平，三島健吾，三和雅史，清水惇，中島昇：列車巡視支援のための線路周辺画像解析エンジンの開発，鉄道総研報告，Vol.36，No.3，pp.5-10，2022
- 2) 野中雄一，吉田大輔，喜多村章悟，横田隆史，長谷川まどか，大津金光：近赤外カラー同時撮像と視覚特性に基づくノイズ低減法，映像情報メディア学会誌，第73巻，第1号，pp.177-189，2018
- 3) 昆野修平，箕浦慎太郎，清水惇，中島昇，小野善将：列車前頭の夜間撮影画像による線路周辺3次元点群の作成とその活用法に関する検討，第29回鉄道技術連合シンポジウム（J-RAIL2022）講演論文集，No.S-2-8-2，2022
- 4) 昆野修平，箕浦慎太郎，中島昇：線路周辺差分検知プログラムの暗所画像への適用拡大に向けた検討，鉄道工学シンポジウム論文集，No.26，pp.121-128，2022
- 5) 三島健吾，川崎恭平，昆野修平，齊藤大樹，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，鉄道工学シンポジウム論文集，No.25，pp.123-130，2021

- 1) 昆野修平，川崎恭平，三島健吾，三和雅史，清水惇，中島

数値解析による RC ラーメン高架橋における構造物音の部材別寄与度の定量化

渡辺 勉* 宇田 東樹** 阿久津 真理子** 清野 多美子***

Numerical Analysis on the Contribution of Each Member to Structure-Borne Sound
in Reinforced Concrete Rigid-Frame Viaducts

Tsutomu WATANABE Toki UDA Mariko AKUTSU Tamiko SEINO

In this study, a numerical experiment was carried out using a finite element modelling to quantify the contribution of each member to structure-borne sound. As examples of specific results, the contribution to the overall value at the 25m point on a reinforced concrete (RC) rigid frame viaduct was 73% for the center slab, 10% for the soundproof wall, and 17% for the cantilever slab. In addition, the contribution of the RC rigid frame viaduct and the adjacent RC girders was 67% and 33% respectively. This indicates that not only the rigid frame viaduct but also the RC girder may have a relatively large contribution to structure-borne sound along the railway line.

キーワード：構造物音，部材振動，高架橋，コンクリート構造，数値解析

1. はじめに

列車走行による構造物音は，列車荷重の移動や車輪およびレール表面に存在する数 μm オーダーの凹凸や線路方向の波長数 m オーダーの軌道変位などに起因して発生する変動作用力（以下，加振力）がレール，軌道パッド，まくらぎや軌道スラブなどから構成される軌道構造を介して土木構造物に伝わり，構造物を構成する各部材の振動面から音として放射されることによって発生する。鉄筋コンクリート（以下，RC）高架橋の構造物音は，一般に数十～1kHz の周波数成分が卓越し，高速鉄道ではその中でも 200Hz よりも低い周波数帯が卓越するとされている^{1) 2)}。

RC 高架橋のうち，本研究で対象とする RC ラーメン高架橋は防音壁，スラブ，はり，柱などの部材を剛結したラーメン構造の高架橋である。RC ラーメン高架橋の構造物音は，高架橋を構成する各部材の固有振動モードが卓越する周波数帯で沿線騒音に占める割合が大きくなることが既往の研究で明らかにされている^{3) 4)}。一方で，RC ラーメン高架橋の構造物音は，上述の各部材から発生した音の合成音であり，周波数帯によって構造物音に対する寄与が大きな部材が異なると想定される。しかしながら既往の研究では，周波数帯ごとの構造物音に対する部材別の寄与度を定量的に検証した事例は行われてい

ないのが実態である。

そこで本研究では，有限要素法をベースとした数値シミュレーションモデル³⁾を用いた数値実験を実施し，200Hz までの周波数帯の構造物音の部材別の寄与度を定量的に明らかにすることとした。なお，RC ラーメン高架橋は地震時の目違い対策として，RC ラーメン高架橋同士の間調整桁と呼ばれる RC 桁が配置されることが多い。このため，本研究では RC ラーメン高架橋に隣接する RC 桁も数値シミュレーションモデルに組み込み，検討の対象とすることとした。

2. 数値解析手法

2.1 対象構造物

図 1 に対象構造物を，表 1 に各要素の材料定数をそれぞれ示す。本研究では，1 ブロック 25m の新幹線の標準的な 3 径間ラーメン高架橋と，それに隣接したスパン 10m の RC 桁を対象とした。RC ラーメン高架橋の橋軸方向の柱中心間隔は 7.875m+8.1m+7.875m，柱断面は 1.1m×1.1m，柱高さは 10m，橋軸直角方向の柱中心間隔は 5.6m，中間スラブの厚さは 0.28m，防音壁の高さは 2.0m，縦はり断面は 0.85m×1.4m，横はり断面は 0.85m×1.3m，路盤コンクリートは 2.5m×0.25m である。基礎形式は杭形式である。RC 桁の主桁の高さは 1.0m，床版の厚さは 0.25m である。また，RC ラーメン高架橋は複線を支える構造であるが，RC 桁については単線を支える桁が並列に配置される構造となっている。なお，新幹線では標準設計が採用されており，部材寸法

* 鉄道力学研究部 軌道力学研究室
** 環境工学研究部 騒音解析研究室
*** アドバンスソフト株式会社

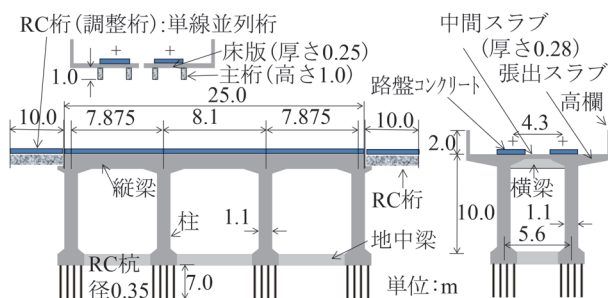


図1 対象構造物

表1 各要素の材料諸元

	RC ラメン	RC 桁
レール種別	60kg レール	
軌道パッド公称ばね定数 (MN/m)	60	
軌道スラブ	寸法 (mm)	4930×2340×190
	ヤング係数 (kN/mm ²)	31
CA モルタル	弾性係数 (N/mm ²)	3500
	厚さ (mm)	25
高架橋 コンクリート	ヤング係数 (kN/mm ²)	26.5 24.0
振動解析における減衰定数 (%) (全てのモードで一律の値)	2%	

がほぼ同じ構造物が路線全体に大量に建設されており⁵⁾、本構造物を対象とすることにより、新幹線の沿線の構造物音の特性の大部分を評価することができる。また、軌道構造は一般的な普通スラブ軌道であり、レールは60kg レールである。

2.2 数値シミュレーションモデルの概要³⁾

図2に数値シミュレーションモデルの概要を示す。200Hz までの沿線の構造物音を効率的に解析するため、2つの振動解析と1つの音響解析の3つのパートから構成される構造音響弱連成解析モデルとした。

具体的には、車両／軌道の相互作用解析により構造物に対する加振力を求め、この加振力を構造物の振動解析モデルに受け渡し、構造物の振動解析を行う。さらに、振動解析で得られた有限要素法の各節点の振動速度を音響解析の境界条件として与えることにより、沿線の構造物音を求めるものである。

振動解析には、車両と鉄道構造物の動的相互作用解析プログラム DIASTARSIII⁶⁾を用いた。車両／軌道の相互作用解析においては、車両は、車体、台車および輪軸を剛体と仮定し、それらをばねとダンパで結合した三次元モデルで、1車両あたり31自由度を有するマルチボディとした。また、列車は車両の端部に設けたばねとダンパで連結して構成した。車両諸元は車両長25m、輪重60kN程度の一般的な新幹線車両6両で、列車速度は270km/hとした。軌道はレール、軌道スラブをばね要素、軌道パッ

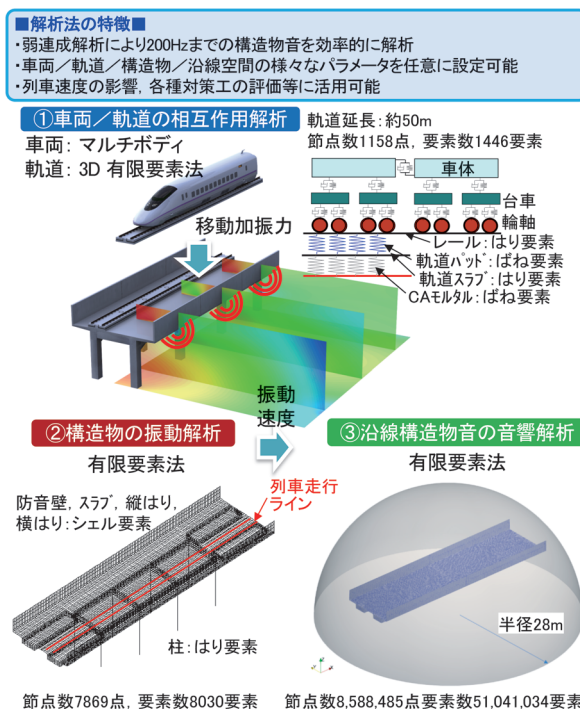


図2 数値シミュレーションモデルの概要³⁾

表2 音響解析の条件

(a) 材料定数

音速 c (m/s)	340
空気密度 ρ (kg/m ³)	1.225
解析周波数 f (Hz)	~200 $\Delta f = 0.49$

(b) 境界条件

ドーム部	無限境界
地面	完全反射
高架橋	面音源

ドとCA モルタルをばね要素でモデル化した。車両とレール間の動的相互作用力は鉛直方向の接触力を Hertz の接触ばねで表現した。構造物の振動解析においては、柱をばね要素、それ以外の部材はシェル要素でモデル化した。これらの振動解析における減衰定数は2%とした⁷⁾。なお、柱下端については地盤ばね等はモデル化せず、完全固定とした。完全固定にしても上部構造物の各部材への影響が小さいことは既往の研究で確認している⁸⁾。

音響解析には、有限要素法の解析コード Advance/ FrontNoise の周波数領域音響ソルバーを用いた⁹⁾。表2に音響解析の条件を示す。音響解析の領域は、対象構造物を包含できる領域として、地表面から半径28mの半球ドーム型の領域に四面体メッシュ(1メッシュサイズ0.2m)を作成し、RC ラーメン高架橋とRC 桁の構造物に音源となる境界条件を設定した。音源は、振動解析により得られた構造物の振動速度の時刻歴波形をフーリエ変換して最大200Hz までの周波数成分に変換し、内部境界面に境界条件として与えた。なお、軌道は複線であるが、列車は、図2の“②構造物の振動解析”の有限要素モデル中に赤線で示す片側の軌道を走行するものとする。

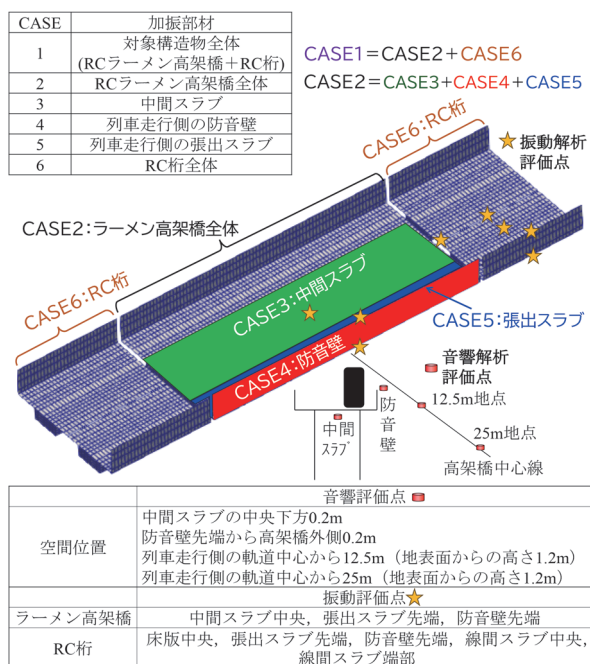


図3 解析ケースと評価点

2.3 解析ケースと評価点

図3に解析ケースを示す。沿線の構造物音の部材別寄与度を求めるために、6つのケースを設定した。具体的には、CASE1はRCラーメン高架橋とRC桁の対象構造物すべてを音源とするケース、CASE2はRCラーメン高架橋全体を音源とするケース、CASE3はRCラーメン高架橋の中間スラブのみを音源とするケース、CASE4は列車走行側の防音壁のみを音源とするケース、CASE5は列車走行側の張出スラブのみを音源とするケース、CASE6はRC桁全体を音源とするケースである。これらの6ケースではいずれも振動解析の結果は同

じものを用いており、図2の“③沿線構造物音の音響解析”においてそれぞれの音響解析の境界条件を設定する際に、対象とする部材のみを音源として設定した。例えば、CASE1では音響解析モデル中のRCラーメン高架橋とRC桁の構造物のすべてのメッシュが音源となる境界条件を設定した。また、CASE3ではRCラーメン高架橋の中間スラブのメッシュのみが音源となる境界条件を設定した。

音響解析評価点は、図3に示すように、中間スラブの中央下方0.2m点、防音壁の先端から高架橋の外側0.2m点、列車走行側の軌道中心から12.5m点（地表面から高さ1.2m）、25m点（地表面から高さ1.2m）の4点とした。なお、25m点は新幹線鉄道騒音測定・評価マニュアル¹⁰⁾において標準測定点として記載される位置、地表面から高さ1.2mは同マニュアルでマイクロホンの設置高さとして記載される高さである。また、これらの4点はいずれもRCラーメン高架橋の橋軸方向の中心線上に設けた。さらに、振動解析評価点は、それぞれの構造物の代表的な部材に着目することとした。具体的には、ラーメン高架橋では中間スラブ中央、張出スラブ先端、防音壁先端の3点、RC桁では床版中央、張出スラブ先端、防音壁先端、線間側張出（以下、線間）スラブ中央、線間スラブ端部の5点とした。

3. 解析結果

3.1 構造物の固有振動モード

図4にRCラーメン高架橋、図5にRC桁の主な固有振動数と対応する振動モードの例をそれぞれ示す。ここに示した振動モードの他にも数多くの振動モードが存在するが、後述する各音響解析評価点の音圧レベルのピー

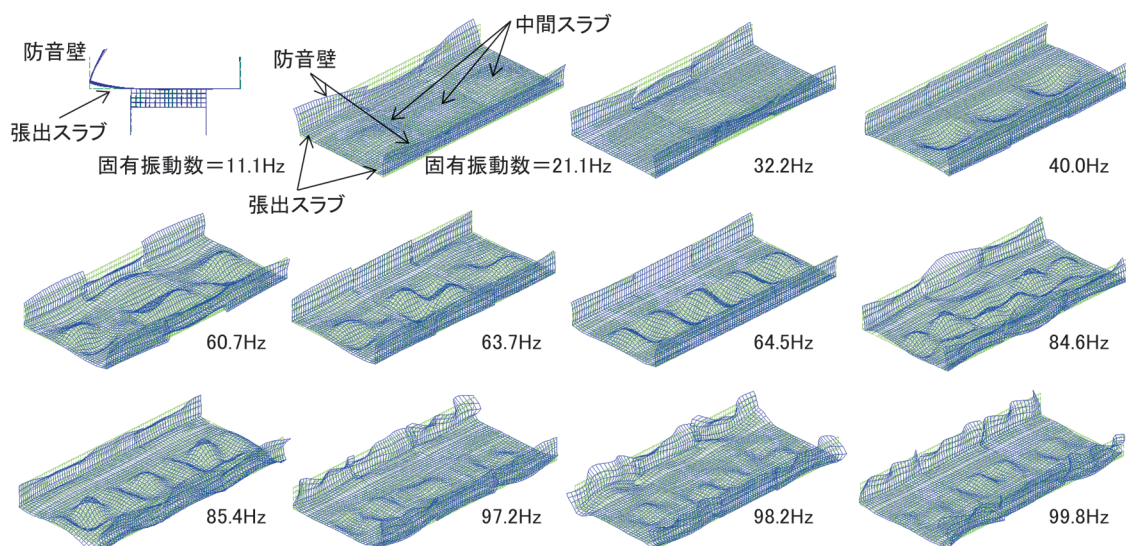


図4 RCラーメン高架橋の固有振動数と振動モードの例

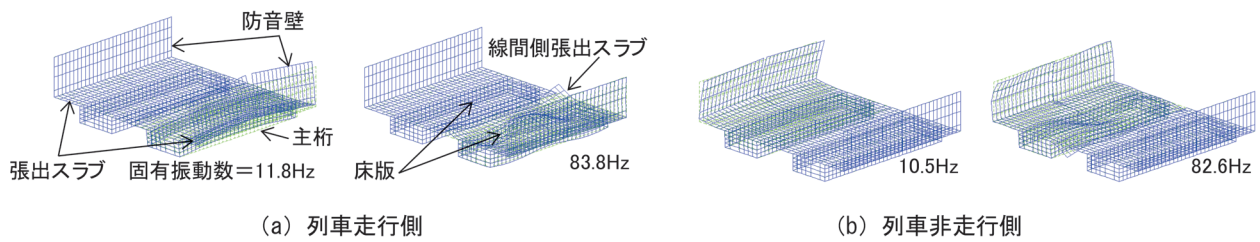


図5 RC 桁の固有振動数と振動モードの例

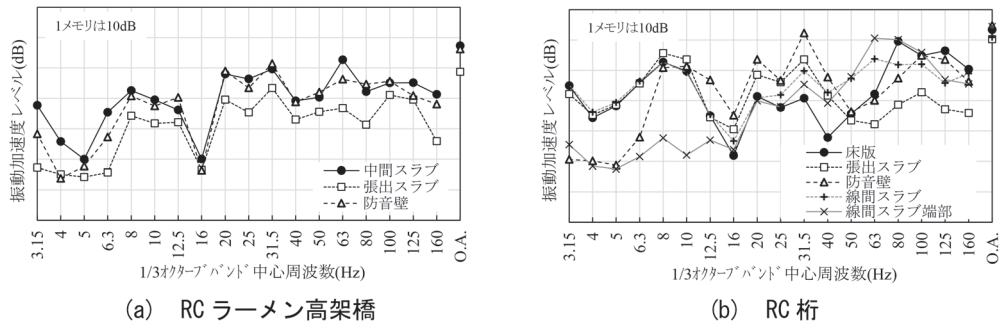


図6 各振動解析評価点における振動加速度レベル

ク周波数に対応する振動モードを抽出して例示した。

図4より、RC ラーメン高架橋については11.1Hzで橋軸方向の張出スラブと防音壁全体が連成した振動モード、21.1Hzで中間スラブの1次振動モードが現れ、32.2Hz、40.0Hzなどと周波数が高くなればなるほど振動モードの腹と節の数が増えていくことが分かる。また、それぞれの振動モードは各部材が複雑に連成していることも確認できる。なお、60Hz～100Hzの周波数帯では、ここで例示したもの以外にも中間スラブ、張出スラブ、防音壁の各部材が連成した振動モードが多数確認された。

図5より、RC 桁については列車走行側の桁では11.8Hzで曲げ1次振動モード、83.8Hzで床版が3つの腹と4つの節を有するW型の振動モードと、線間側の張出スラブの振動モードが連成している状態が確認できる。一方、列車非走行側の桁では対応する固有振動数がそれぞれ10.5Hz、82.6Hzであった。両者の桁で固有振動数が異なるのは、それぞれの桁の張出スラブの張出長が異なる（走行側1.0m、非走行側0.5m）ためであると考えられる。

3.2 各振動解析評価点の振動加速度レベル

図6に各振動解析評価点における振動加速度レベルを示す。2つの図の縦軸は同じ値を示す。それぞれ各部材の代表点1点のみでの振動加速度レベルではあるが、12.5Hz以下ではRC ラーメン高架橋の各部材の応答に比べて、RC 桁の床版、張出スラブ、防音壁、線間スラブなどの応答が大きいことが分かる。また、20Hzや31.5HzでもRC ラーメン高架橋の各部材の応答に比べて、RC 桁の防音壁の応答が大きい。さらに、63Hzよ

りも高い周波数領域でもRC ラーメン高架橋の各部材の応答に比べて、RC 桁の床版、防音壁、線間スラブ、線間スラブ端部や防音壁の応答が大きいことが分かる。

3.3 各音響解析評価点の音圧レベルの比較

3.3.1 RC ラーメン高架橋の各部材を音源とした場合の各音響解析評価点の音圧レベルの比較

図7に各音響解析評価点におけるRC ラーメン高架橋の音圧レベルの1/3オクターブバンド中心周波数ごとの比較を示す。ここで、4つの図の縦軸の値は同じ値を示す。以降の図も図7と同じである。なお、本論文では、建具のがたつきなどに影響を及ぼす低周波成分までを対象に評価を行うこととするため、騒音の評価を行う際に一般的な周波数の重み付け特性であるA特性による補正は行っていない。また、オーバーオール値（O.A. 値）とは200Hzまでの各周波数領域のパワーの総和を表すものとする。

中間スラブの中央下方0.2mの評価点では、RC ラーメン高架橋全体を音源としたケースと中間スラブのみを音源としたケースがほぼ同じ音圧レベルであり、中間スラブの寄与が大きいことが分かる。また、防音壁の先端から高架橋の外側0.2mの評価点、12.5m点、25m点においても中間スラブの寄与が大きいことが分かる。

また、図8に、図7に示した12.5m点、25m点における1/3オクターブバンド中心周波数ごとの音圧レベルにおいてピークが見られる周波数帯である63Hz付近の音圧分布を例として示す。なお、出力断面はRC ラーメン高架橋の中心線上の橋軸直角方向断面である。また、図中

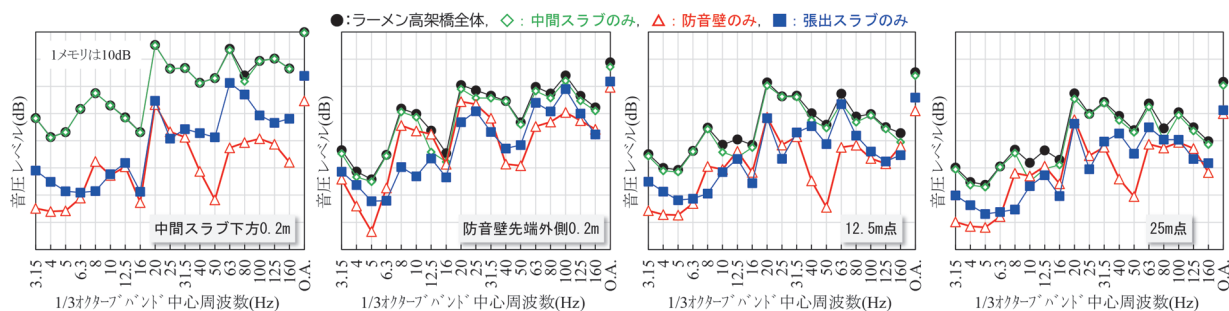


図7 各音響解析評価点における RC ラーメン高架橋の音圧レベルの比較

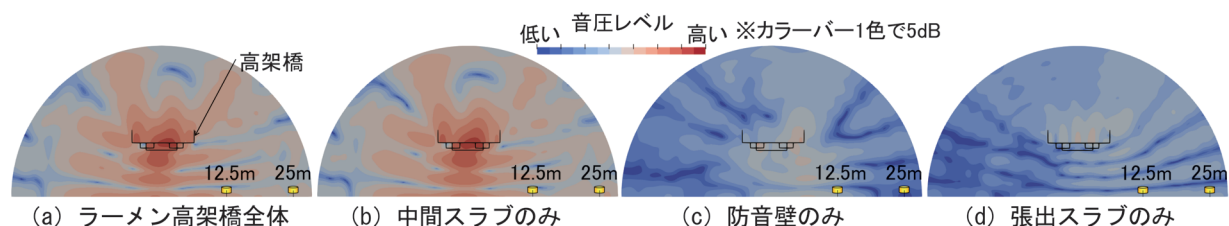


図8 RC ラーメン高架橋の各部材を音源とした場合の音圧分布の例 (63Hz 付近)

のカラーバーは以降で掲載する図においても同じ色は同じ音圧レベルを示すものとする。図8より、音圧分布を見てもラーメン高架橋全体を音源としたケースと中間スラブのみを音源としたケースがほぼ同じとなっており、中間スラブの寄与が大きいことが分かる。また、防音壁のみ、張出スラブのみを音源としたケースについては、場所によっては音圧レベルが大きくなっている箇所もあるが、中間スラブに比べるとその寄与は小さいことが分かる。

3.3.2 RC ラーメン高架橋と RC 桁の各音響解析評価点の音圧レベルの比較

図9に各音響解析評価点における RC ラーメン高架橋と RC 桁の音圧レベルの 1/3 オクターブバンド中心周波数ごとの比較を示す。図9より、特に 12.5m 点、25m 点を見ると、10Hz 以下の周波数領域および 80Hz において、ラーメン高架橋全体を音源としたケースよりも RC 桁全体を音源としたケースの方が音圧レベルが大きいことが分かる。このように RC ラーメン高架橋の橋軸方向の中心線で評価しているにも関わらず、RC ラーメン高架橋に隣接する RC 桁の方が寄与が大きい周波数帯があることが分かった。

また、図10および図11に、RC ラーメン高架橋全体および RC 桁全体を音源としたケースについて、10Hz、20Hz、80Hz 付近の音圧分布の例をそれぞれ示す。なお、「付近」とは当該周波数に最も近い解析周波数を示すこととする。10Hz 付近は RC 桁の曲げ 1 次振動モード、20Hz 付近は RC ラーメン高架橋の中間スラブの 1 次振動モード、80Hz 付近は図9で示した 12.5m 点、25m 点において RC 桁にピークが見られる周波数帯である。な

お、出力断面は RC ラーメン高架橋の中心線上の橋軸直角方向断面とその断面に直交する橋軸方向断面の 2 断面である。図6に示した通り、10Hz 付近においては RC 桁の振動加速度レベルが大きいので、RC ラーメン高架橋よりも RC 桁の方が高い音圧レベルになるとともに、RC 桁で発生した音圧は RC ラーメン高架橋まで伝播していることが分かる。一方、20Hz 付近においては RC ラーメン高架橋の中間スラブの 1 次振動モードの影響により、RC 桁よりも RC ラーメン高架橋の方が高い音圧レベルになるとともに、RC ラーメン高架橋で発生した音圧は RC 桁まで伝播していることが分かる。80Hz 付近においては RC ラーメン高架橋と RC 桁の近傍で発生している音圧レベルのコンター図では大きな違いは見られないが、10Hz 付近と同様に、RC 桁の振動加速度レベルが大きいので、RC ラーメン高架橋よりも RC 桁の方が高い音圧レベルになったと考えられる。また、RC 桁から発生する音の方が距離減衰が小さく、RC ラーメン高架橋の中心線付近まで、音圧レベルが減衰することなく伝播していることが分かる。これは、図10および図11で着目した橋軸方向断面が解析モデルの中央であり、RC ラーメン高架橋では中間スラブの振動モードがモード形の節に近く、一方で RC 桁では図5に示した通り、線間側張出スラブの振動モードがモード形の腹に当たるため、RC 桁の音圧の方がより伝播したものと推察される。

3.4 沿線構造物音に占める部材別寄与度

図12に各音響解析評価点の音圧レベルに対する部材別の寄与度をそれぞれ示す。図12(a)では、RC ラー

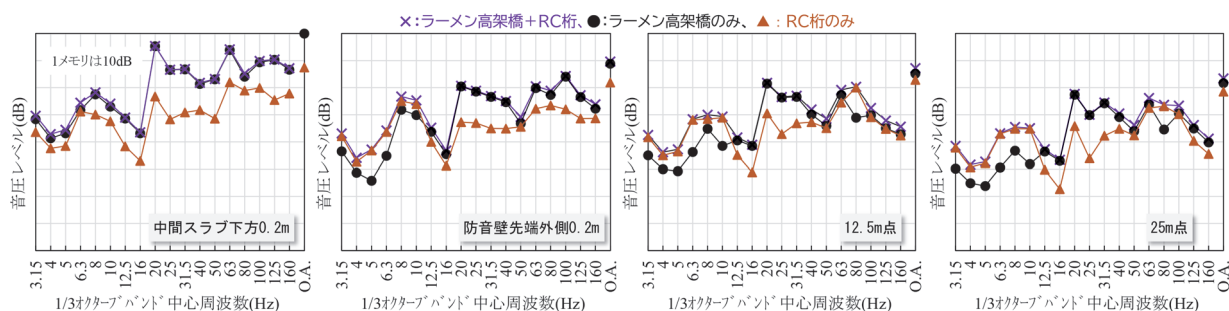


図9 各音響解析評価点におけるRCラーメン高架橋とRC桁の音圧レベルの比較

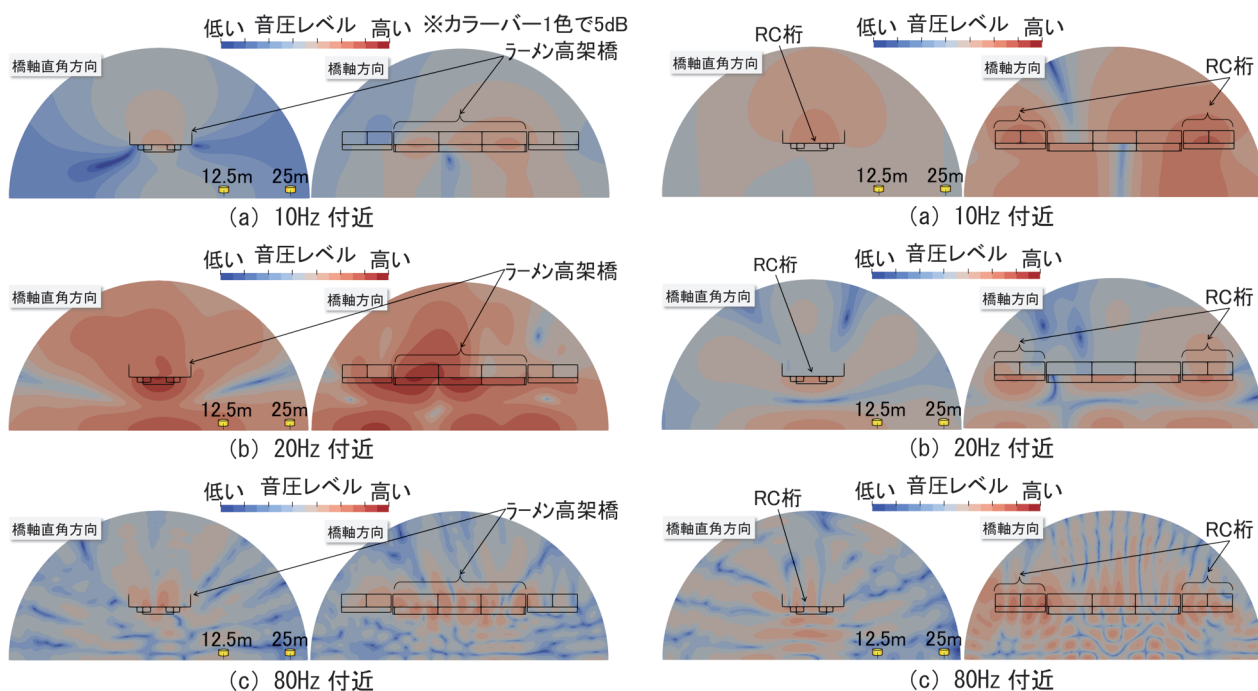


図10 RCラーメン高架橋全体を音源とした場合の音圧分布の例

図11 RC桁全体を音源とした場合の音圧分布の例

メン高架橋の部材別の寄与度を示した。どの評価点においても中間スラブの寄与が大きいことが分かる。一方で、防音壁の先端から高架橋の外側0.2mの評価点、12.5m点、25m点を見ると、12.5Hz、63Hz、80Hzの周波数で防音壁や張出スラブの寄与が中間スラブを上回ることが分かる。これは図4に示した振動モードより、11.1Hzにおける橋軸方向の張出スラブと防音壁全体が連成した振動モード、60.7Hzや84.6Hzにおける中間スラブに加えて張出スラブにも腹と節が確認できる振動モードが存在することが影響していると考えられる。このようにRCラーメン高架橋の沿線の構造物音は板状の部材である中間スラブの影響が大きいと考えられるが、周波数帯によっては中間スラブではない部材の方が音圧レベルが大きくなる場合もあることが明らかとなった。

図12(b)では、RCラーメン高架橋とRC桁の寄与度の比較を示した。図5にも示したように、12.5m点、

25m点において、特に10Hz以下の周波数領域および80Hzにおいて、RCラーメン高架橋よりもRC桁の方が寄与が大きいことが分かる。これは図6に示した振動加速度レベルより、当該周波数帯ではRCラーメン高架橋よりもRC桁の方が振動加速度レベルが大きいことに起因していると考えられる。また、図5に示した振動モードより、11.8HzにおけるRC桁の曲げ1次モードや83.8Hzにおける床版と線間側の張出スラブが連成した振動モードが存在することも影響していると考えられる。

図13に25m点におけるO.A.値に対する寄与度を示す。図より、RCラーメン高架橋から発生する構造物音の25m点におけるO.A.値に対する寄与度は中間スラブが73%、防音壁が10%、張出スラブが17%となった。また、RCラーメン高架橋とRC桁の寄与度は前者が67%、後者が33%となっており、沿線の構造物音に対する寄与度はラーメン高架橋だけではなくRC桁も比較的大きい可能性が示された。

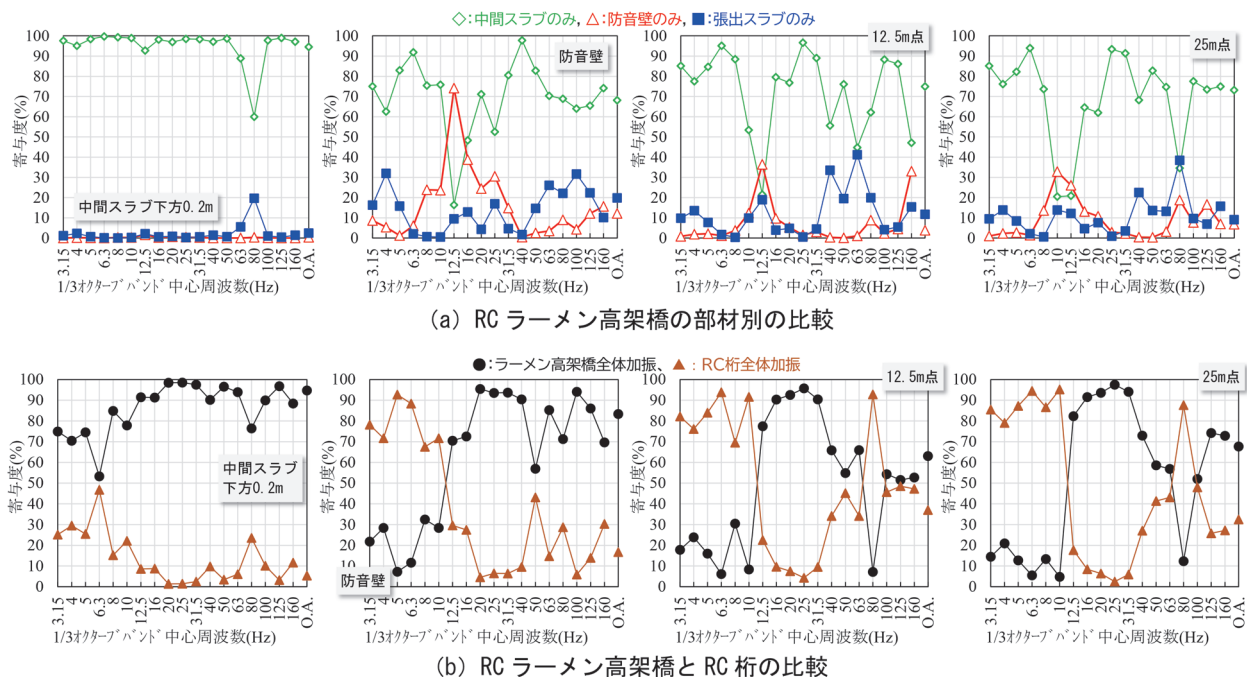


図 12 各音響解析評価点の音圧レベルに対する部材別寄与度

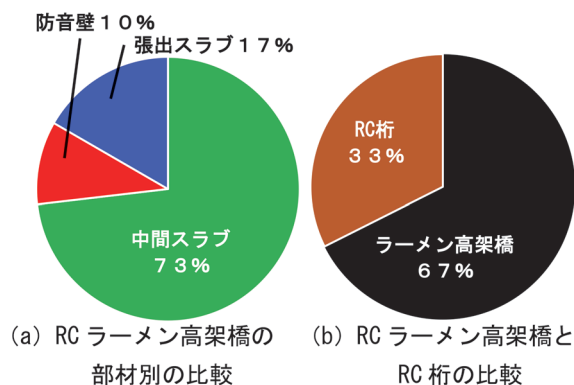


図 13 25m 点における O.A. 値に対する寄与度

4. まとめ

本研究では有限要素法をベースとした数値シミュレーションモデルを用いた数値実験を実施し、構造物音の部材別の寄与度を明らかにした。具体的には、RC ラーメン高架橋から発生する構造物音の 25m 点における O.A. 値に対する寄与度は中間スラブが 73%、防音壁が 10%、張出スラブが 17% となり、中間スラブの寄与度が大きいことを定量的に明らかにした。また、RC ラーメン高架橋と RC 桁の寄与度は前者が 67%、後者が 33% となっており、沿線の構造物音に対する寄与度はラーメン高架橋だけではなく RC 桁も比較的大きい可能性を示した。今後は、沿線の構造物音に対する寄与が大きいと新たに明らかとなった RC 桁についても振動モード等を詳細に分析する予定である。

文 献

- 1) 長倉 清：構造物音の特性と低減対策，JREA，Vol.50，No.12，pp.51-53，2007
- 2) 北川敏樹：鉄道騒音の特性と防止策，日本音響学会誌，Vol.64，No.10，pp.629-634，2008
- 3) 渡辺勉，宇田東樹，北川敏樹，唐津卓哉，清野多美子，尾川慎介：数値解析に基づく RC ラーメン高架橋の構造物音評価法，鉄道総研報告，Vol.34，No.8，pp.41-46，2020
- 4) 上妻雄一，長倉清：新幹線コンクリート高架橋の振動・音響特性，鉄道総研報告，Vol.25，No.11，pp.17-22，2011
- 5) 日本国有鉄道：東北新幹線工事誌 大宮盛岡間，1983
- 6) 涌井一，松本信行，松浦章夫，田辺誠：鉄道車両と線路構造物との連成解析法に関する研究，土木学会論文集，No.513/I-31，pp.129-138，1995
- 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（コンクリート構造物）第 I 編 基本原則編／第 II 編 橋りょう，付属資料 5-3，丸善出版，2023
- 8) 渡辺勉，曾我部正道，徳永宗正：車両／軌道／構造物の各種パラメータが鉄道 RC ラーメン高架橋の部材振動特性に及ぼす影響に関する数値解析的検討，土木学会論文集 A2（応用力学），Vol.69，No.2，pp.I_821-I_832，2013
- 9) 松原聖，尾川慎介：音響解析ソフトウェア Advance/FrontNoise への無限要素導入，アドバンスシミュレーション，Vol.23，pp.55-87，2016
- 10) 環境省：新幹線鉄道騒音測定・評価マニュアル，2015

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6号

2025年6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. 6

Jun. 2025

PAPERS

- Derailment Detection of Freight Wagon Using Mechanical Contact Sensors
.....S.MAMADA, T.OTA, K.MIYAHARA, K.KOSUGI (1)
- Method for Evaluating Running Safety of Railway Vehicles during Earthquake Using Extensive
Characteristics of Seismic Track Vibrations
.....K.IIDA, K.NANAMI, M.KUZUTA (11)
- Load-bearing Mechanism of Beam-column Joints of Rigid Frame Viaducts Subjected to Horizontal
Forces in Two Directions
.....R.KONISHI, Y.NAKATA, K.WATANABE (17)
- Application of Image Analysis Engine around Railway Track to Night Vision Images
.....A.SHIMIZU, S.MINOURA (27)
- Numerical Analysis on the Contribution of Each Member to Structure-Borne Sound in Reinforced
Concrete Rigid-Frame Viaducts
.....T.WATANABE, T.UDA, M.AKUTSU, T.SEINO (35)

