

# 鉄道総研報告

第40巻 第6号

2026年6月

## 論文

- 車両** 車輪曲げひずみを用いた車輪／レール接触位置の連続測定手法  
..... 野口芳直, 錦織大幸 (1)
- 施設** 新幹線高速走行区間を対象とした累積損傷度理論による路床沈下量の推定  
..... 伊藤壱記, 桃谷尚嗣, 景山隆弘, 中村貴久, 川中島寛幸 (11)
- 施設** 曲線中のレールの疲労破壊に関する安全性の照査方法  
..... 細田充, 弟子丸将 (22)
- 施設** 気象条件の変化による岩石中の割れ目の進展性評価手法  
..... 久河竜也, 浦越拓野, 河村祥一 (33)

## 技術報告

- 車両** 燃料電池車両の技術基準を定める告示・同解釈基準の概要  
..... 八島悠太, 米山崇, 水野寿洋, 遠藤康信 (48)
- 運転** VR技術を用いた車掌の基本動作習得支援教材の開発  
..... 菊地史倫 (56)





車輪曲げひずみを用いた  
車輪／レール接触位置の連続測定手法

野口 芳直\* 錦織 大幸\*

## A Continuous Measurement Method of Wheel/Rail Contact Position Using Wheel Bending Strain

Yoshinao NOGUCHI Hiroyuki NISHIKORI

This study proposes a method for continuously measuring wheel/rail contact position based on the measurement of the bending strain of wheel. The optimal placement of strain gauges was determined using finite element analysis. An instrumented wheelset was then fabricated with strain gauges attached at those positions, and a static load test was conducted on the wheelset. We have also developed a method for measuring contact positions by solving a nonlinear equation. This equation uses parameters derived from the relationship between load position and strain gauge bridge output obtained in the static load test. Running tests conducted with railway vehicles confirmed that the proposed method can measure the contact position continuously. Additionally, an evaluation using paint confirmed that the measurement accuracy in this test was  $\pm 2$  mm.

キーワード：車輪／レール接触位置，PQ 測定，乗り上がり脱線，走行安全性，FEM 解析

## 1. はじめに

我が国における鉄道車両の走行安全性評価では、車輪／レール間に作用する輪重 (P) , 横圧 (Q) や、横圧を輪重で除した脱線係数 (Q/P) を、ひずみゲージ (以下、ゲージ) を貼付してセンサ化した専用の輪軸 (以下、PQ 軸) を用いて測定し、それぞれが目安値以下であることを確認する。脱線係数の目安値は、車輪がフランジ直線部でレールと 1 点接触している条件における力のつり合いから求められる Nadal の式に車輪／レール間の摩擦係数 0.3 を代入して得られる限界脱線係数に対して、安全率を乗じて求められる<sup>1)</sup>。したがって現行の脱線係数による評価では、車輪／レール接触位置がフランジ直線部に達していないことを間接的に確認していると考えられることができる。

一方、摩耗やキシリ音対策のためレールに塗油がなされると摩擦係数が 0.3 を下回る場合がある。このとき限界脱線係数は大きくなり脱線に至る可能性は低下すると考えられるものの、脱線係数測定値は一般に増加する傾向<sup>2)</sup>があり、測定値が目安値を超えると危険と判定される。このような本来安全な状態に対する過剰な危険判定を減らすため、まくらぎ方向の車輪／レール接触位置を測定することを検討している。接触位置が得られれば、フランジ直線部で接触していないことを直接確認できるため、より実態に即した評価ができる可能性がある。

接触位置は、たとえば車輪に貼付したゲージを用いて接触位置変化に対する車輪の応力分布変化を測定することで得られ、筆者は接触位置のまくらぎ方向および車輪半径方向変化を考慮した、フランジ接触状態でも測定可能な手法を提案した<sup>3)</sup>。しかし、同手法は間欠的であるほか、検証は台上試験に留まった。

そこで、本研究では従前の提案手法<sup>3)</sup>を基に、車輪がレールに乗り上がる条件においても接触位置を連続的に測定可能な手法を開発した<sup>4) 5)</sup>。本稿では文献 4, 5 に基づき、開発手法の概要ならびに実車両を用いた走行試験による妥当性の検証結果について報告する。

\* 車両技術研究部 車両運動研究室

## 2. 接触位置の連続測定手法

### 2.1 接触位置測定用ひずみゲージ貼付位置の検討

PQ 軸を製作する際は、インバータノイズなどの外乱に対する SN 比を高めるため、一般にゲージは車輪表面の輪重または横圧に対する測定感度が高い位置に貼付する。本件においても接触位置測定用ゲージは、接触位置に対する測定感度が高い位置に貼付し、ブリッジ結線することにした。貼付位置や結線方法は FEM 解析により検討した。図 1 に FEM 解析モデルを示す。解析対象は直径 804mm の PQ 車輪で、車輪中心から 285.5mm の位置に直径 50 mm の輪重測定用孔が 8 つ、等間隔に設けられている。各輪重測定用孔は 12 時方向から時計回りに孔①～孔⑧と定義する。材料物性は一般的な鋼材とし、メッシュ分割にはヘキサ要素を使用した。境界条件として車軸との嵌め合い部を拘束し、輪重、横圧想定荷重（以下、輪重、横圧）50kN および前後接線力想定荷重（以下、接線力）5kN をそれぞれ単独で負荷した。

図 2 に輪重を車輪踏面の反フランジ側端部、またはフランジトップに負荷した際における輪重測定用孔周辺の応力分布例を示す。同図では圧縮方向のひずみ量の増加に伴い、コンター色が青色から赤色となるように示している。孔の左右近傍では、輪重負荷位置に近い側が赤色、反対側が青色と、ひずみ量に明確な差が認められることから、同位置では接触位置変化を捉えることができると考えられる。したがって、各孔の左右近傍を貼付位置の候補とした。ブリッジ結線は接触位置変化に対する感度を高めるためにいくつかの結線方法を試行した結果、反フランジ側、フランジ側のそれぞれで、車輪中心に対して点对称となる位置に貼付されているゲージを用いて 4 回路ずつ、計 8 回路構成（図 3）することにした。また接触位置測定には、各個別ブリッジ回路出力を用いて式(1)の演算により変換した接触位置測定用ブリッジ出力  $c_i$  を用いることにした。なお、図 3 における「IT1」などの文字はゲージの名称を表しており、1 文字目が孔の番号、2 文字目が車輪の裏表（T：反フランジ側、F：フランジ側）、3 文字目が孔の左右（左：1、右：2）と定義している。また、孔①～孔⑤および孔②～孔⑥を用いる出力を 1 系統、その他を 2 系統と定義する。

$$c_i = (CF_{2i-1} + CF_{2i}) - (CT_{2i-1} + CT_{2i}) \quad (i = 1, 2) \quad (1)$$

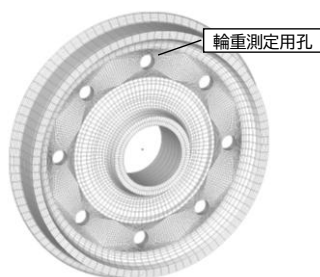


図 1 FEM 解析モデル

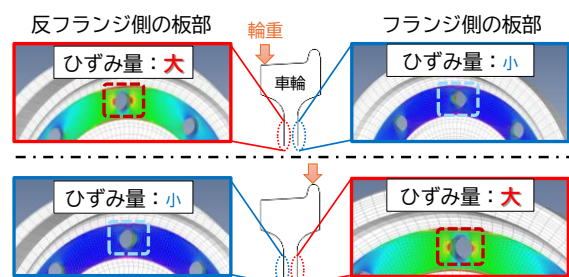


図 2 輪重負荷時の応力分布例

詳細なゲージ貼付位置を決定するため、解析結果を用いて荷重負荷位置とブリッジ感度（単位荷重あたりのブリッジ出力）の関係における回帰直線の傾きおよび切片を導出した。以下では、これらをまとめて接触変数と定義し、ブリッジ種別ごとに表 1 に示す記号で記述する。接触変数の下付き文字  $i$  は系統、P, Q, T は荷重荷重種別を表す。貼付位置を決定するための指標は、接触変数のうち輪重負荷位置（接触位置）に対する測定感度を表す、傾き  $m_p$  とした。

図 4 に輪重の周方向負荷位置と傾き  $m_{p1}$  の関係を示す。凡例は半径方向の貼付位置で、孔中心を基準(0mm)として、車輪中心方向が負となるように定義している。なお、系統間には 90deg の位相差があるものの、波形形状

は同一であることから、同図では代表して 1 系統の結果を示している。傾きは、孔中心から-10mm の位置に貼付した場合に最も大きくなったことから、同位置を半径方向貼付位置とした。一方、周方向については、孔の縁に近いほど応力集中により傾きは大きくなると考えられることから、無理なく貼付できるように、孔の縁から 4 mm の位置とした。

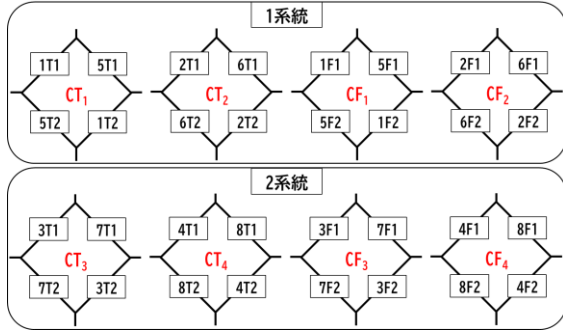


図3 接触位置測定用個別ブリッジ回路

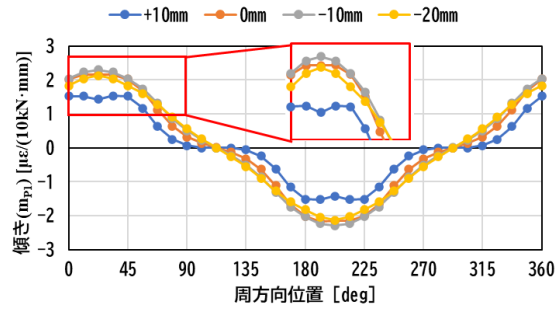


図4 輪重の周方向負荷位置と傾き $m_{p1}$ の関係

表1 接触変数の記号例

ブリッジ種別	傾き $[\mu\varepsilon / (10\text{kN}\cdot\text{mm})]$	切片 $[\mu\varepsilon / 10\text{kN}]$
輪重 (出力: $p_i$ )	$j_{Pi}(\theta), j_{Qi}(\theta), j_{Ti}(\theta)$	$k_{Pi}(\theta), k_{Qi}(\theta), k_{Ti}(\theta)$
横圧 (出力: $q_i$ )	$s_{Pi}(\theta), s_{Qi}(\theta), s_{Ti}(\theta)$	$t_{Pi}(\theta), t_{Qi}(\theta), t_{Ti}(\theta)$
接触位置 (出力: $c_i$ )	$m_{Pi}(\theta), m_{Qi}(\theta), m_{Ti}(\theta)$	$n_{Pi}(\theta), n_{Qi}(\theta), n_{Ti}(\theta)$

※下付き文字 $i$ は系統,  $P, Q, T$ は負荷荷重種別を表す

## 2.2 接触位置測定用 PQ 軸の校正

解析対象と同じ車輪で構成される PQ 軸に接触位置用ゲージを貼付した図5に示す接触位置測定用 PQ 軸を製作し、校正を実施した。図6に接触位置測定用 PQ 軸のゲージ貼付位置のイメージを示す。接触位置用ゲージの他に輪重・横圧用ゲージも貼付しており、新連続法<sup>6)</sup>用にブリッジ結線している。通常の新連続法用 PQ 軸の校正では、車輪周方向の 32 点に対して、輪重を車輪踏面上の基準位置、横圧を車輪背面の基準位置と同じ高さで負荷して、各荷重に対するブリッジ感度をそれぞれ求める。一方、本件では輪重・横圧ならびに接線力について、荷重の大きさや負荷位置を変化させたときのブリッジ出力をそれぞれ測定し、ブリッジ種別ごとに接触変数を求めた。

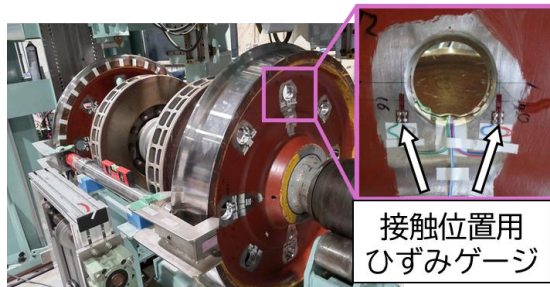


図5 接触位置測定用 PQ 軸の外観

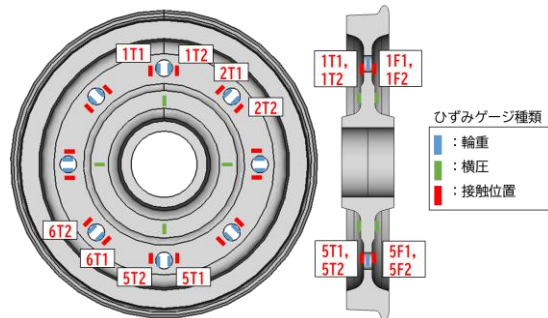


図6 PQ 軸のゲージ貼付位置のイメージ

校正結果の代表例として、輪重負荷時の周方向負荷位置と接触変数の関係を図7に示す。同図では代表して 1 系統の結果を示しており、参考として FEM 解析結果も併せて示している。輪重ブリッジの傾きはほ

ば  $0\mu\epsilon/(10\text{kN}\cdot\text{mm})$  と小さいが、横圧ブリッジの傾きは最大で  $0.4\mu\epsilon/(10\text{kN}\cdot\text{mm})$  程度とやや大きく、曲線通過時などで接触位置が踏面基準位置から大きく移動した場合、新連続法による横圧測定値には、輪重による見かけの横圧が数 kN 程度重畳すると考えられる。また、周方向位置に対して傾きは正弦波状に変化しており、1 系統では  $22.5\text{deg}$  や  $202.5\text{deg}$  周辺では測定感度が高いものの、 $90\text{deg}$  や  $270\text{deg}$  周辺では低かった。一方で、横圧、接触位置ブリッジの切片はそれぞれ最大  $1\mu\epsilon/10\text{kN}$ 、 $6\mu\epsilon/10\text{kN}$  程度と小さいものの、輪重ブリッジは最大約  $30\mu\epsilon/10\text{kN}$  と大きかった。

以上のように荷重の大きさおよび荷重位置が接触変数にそれぞれ影響を及ぼすことがわかった。

なお、解析結果と校正結果を比較すると、傾きは概ね一致したものの、切片は定量的に一部異なる場合が認められた。ゲージ貼付位置のばらつきによるものと考えられる。

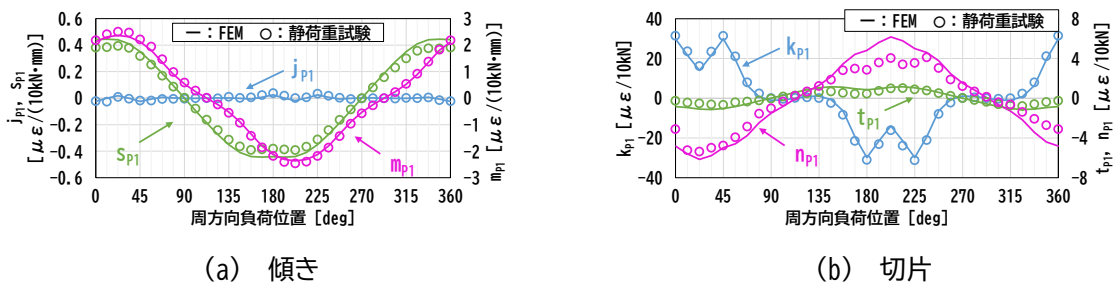


図 7 輪重負荷時の周方向負荷位置と接触変数の関係

### 2.3 接触位置の連続推定式

荷重の大きさおよび荷重位置とブリッジ出力の関係（接触変数）が得られたことから、これらを活用した接触位置の連続測定手法について検討した。図 8 に本件における接触位置測定の座標系を示す。同図では座標軸と併せて接触位置測定用 PQ 軸の車輪踏面形状を示している。踏面基準位置を原点として、まくらぎ方向を x 軸、垂直方向を z 軸とした。以下では、接触位置における z 座標を接触高さとして定義して接触位置と区別する。同車輪は修正円弧踏面形状であり、フランジ直線部の接触位置 (x) は  $36\text{mm}\sim 40\text{mm}$ 、接触高さ (z) は  $10\text{mm}\sim 19\text{mm}$  に概ね相当する。

校正結果から、車輪踏面のある一点に輪重  $P[\text{kN}]$ 、横圧  $Q[\text{kN}]$ 、接線力  $T[\text{kN}]$ （以下、まとめて接触力）が図 8 に示す方向に同時に作用する条件において、輪重ブリッジ出力  $p_i[\mu\epsilon]$ 、横圧ブリッジ出力  $q_i[\mu\epsilon]$ 、ならびに接触位置ブリッジ出力  $c_i[\mu\epsilon]$  は、接触変数を用いて式(2)～式(4)のように表せる。

$$p_i = (j_{Pi}(\theta)x + k_{Pi}(\theta))\frac{P}{10} + (j_{Qi}(\theta)z + k_{Qi}(\theta))\frac{-Q}{10} + (j_{Ti}(\theta)x + k_{Ti}(\theta))\frac{T}{10} \quad (2)$$

$$q_i = (s_{Pi}(\theta)x + t_{Pi}(\theta))\frac{P}{10} + (s_{Qi}(\theta)z + t_{Qi}(\theta))\frac{-Q}{10} + (s_{Ti}(\theta)x + t_{Ti}(\theta))\frac{T}{10} \quad (3)$$

$$c_i = (m_{Pi}(\theta)x + n_{Pi}(\theta))\frac{P}{10} + (m_{Qi}(\theta)z + n_{Qi}(\theta))\frac{-Q}{10} + (m_{Ti}(\theta)x + n_{Ti}(\theta))\frac{T}{10} \quad (4)$$

ここで  $x, z[\text{mm}]$  は、それぞれ接触位置および接触高さの座標である。なお、横圧は校正における荷重方向と逆向きを正とするため、符号を負としている。

車輪踏面形状を計測することで、 $z$  は  $x$  の関数として扱うことができるので、接触位置における車輪周方

向位置 $\theta$ とブリッジ出力，ならびに接触力が得られれば，式(2)～式(4)のいずれかを $x$ について解くことで接触位置が得られる。 $\theta$ は，たとえば車軸軸端に取り付けた新連続法用エンコーダにより得られる。接触力は新連続法により得られるが，曲線走行時などで接触位置が踏面中心から大きく離れると，新連続法による横圧には，輪重による見かけの横圧が重畳する。また，出力 $p_i$ は出力 $q_i$ ， $c_i$ よりブリッジ感度が低くノイズの影響を受けやすい。そこで，式(3)と式(4)を用いて， $Q$ を消去することで得られる式(5)（以下，推定式 $f_i(x)$ ）について考える。

$$f_i(x) \equiv c_i - (m_{pi}x + n_{pi})\frac{P}{10} - (m_{Ti}x + n_{Ti})\frac{T}{10} - (m_{Qi}z + n_{Qi})\left\{\frac{q_i - (s_{pi}x + t_{pi})\frac{P}{10} - (s_{Ti}x + t_{Ti})\frac{T}{10}}{s_{Qi}z + t_{Qi}}\right\} = 0 \quad (5)$$

推定式は $x$ に関する非線形方程式であり，同式を解くことで接触位置 $x$ が得られると考えられる。しかし，接触変数の値，すなわち周方向位置 $\theta$ によっては解を複数持つ場合が考えられるほか，ブリッジ出力や接触変数は系統間で90degの位相差があることから，推定式も系統間で同様の位相差があると考えられるため，車輪全周にわたって接触位置に対する測定感度が高くなるように系統を使い分けることが望ましい。そこで，いずれの周方向位置においても推定式が単一解をもち，かつ測定感度が高くなるように，周方向位置に応じて重み付けした各系統の推定式の和で表される式(6)の非線形方程式（以下，連続推定式 $g(x)$ ）を解くことで接触位置 $x$ を得ることにした。

$$g(x) \equiv w_1 \times f_1(x) + w_2 \times f_2(x) = 0 \quad (6)$$

ここで $w_1$ ， $w_2$ は $f_1(x)$ と $f_2(x)$ の重みを決める関数（以下，推定式の重み付け関数）で，図9に示すように周方向位置によって系統を使い分けるために矩形波状とした。

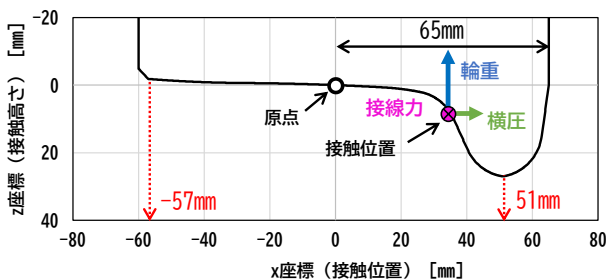


図8 接触位置測定の座標系

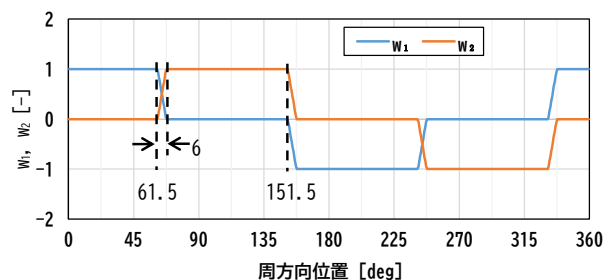


図9 推定式の重み付け関数

## 2.4 接触位置の補正

前節で導出した連続推定式では，新連続法による輪重，接線力測定値を用いる。しかし，新連続法では接触位置の移動による影響を考慮しておらず，これによる測定誤差が接触位置求解に影響を及ぼす。そこで，最初に連続推定式により求解した接触位置（以下，仮接触位置）を用いて新連続法による測定値を補正し，これら補正值を用いて接触位置を再計算することにした。以下に再計算の手順を示す。

- ① 仮接触位置を用いて、式(7)で表される輪重ブリッジ出力 $p'_i$ を算出する。なお、出力 $p'_i$ は接触位置が0mmとなるように補正した輪重ブリッジ出力とみなすことができる。式(7)中の $Q_{corr}$ は、接触位置の移動による影響を補正した横圧（以下、補正横圧）で、式(8)で得られる横圧ブリッジ出力 $q'_i$ に、新連続法の重み付け関数<sup>6)</sup> ( $S_Q, C_Q$ ) を乗じ式(9)で求める。

$$p'_i = p_i - k_{Qi} \frac{-Q_{corr}}{10} - \left( j_{Pi} x_{temp} \frac{P}{10} + j_{Qi} z_{temp} \frac{-Q_{corr}}{10} + j_{Ti} x_{temp} \frac{T}{10} \right) \quad (7)$$

$$q'_i = q_i - (s_{Pi} x_{temp} + t_{Pi}) \frac{P}{10} - s_{Qi} z_{temp} \frac{-Q}{10} - (s_{Ti} x_{temp} + t_{Ti}) \frac{T}{10} \quad (8)$$

$$Q_{corr} = [S_Q \quad C_Q] \begin{bmatrix} q'_1 \\ q'_2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

- ② 出力 $p'_i$ を用いて、接触位置の影響を補正した輪重、接線力（以下、それぞれ補正輪重 $P_{corr}$ 、補正接線力 $T_{corr}$ ）を式(10)により算出する。ここで、式(10)中の $S_{P_{corr}}$ や $C_{P_{corr}}$ などは補正した重み付け関数で、新連続法の重み付け関数を再計算するための低速走行試験において、出力 $p'_i$ を用いて作成したものである。

$$\begin{bmatrix} P_{corr} \\ T_{corr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{P_{corr}} & C_{P_{corr}} \\ C_{T_{corr}} & S_{T_{corr}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p'_1 \\ p'_2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

- ③ 式(4)の左辺と右辺の差で表される式(11)に補正輪重、補正横圧、補正接線力を代入し、さらに同式を連続推定式（式(6)）に代入して、接触位置を求解する。このようにして得られた解を、以下では補正接触位置 $x_{corr}$ と定義する。

$$f_i(x) \equiv c_i - (m_{Pi} x + n_{Pi}) \frac{P_{corr}}{10} - (m_{Ti} x + n_{Ti}) \frac{T_{corr}}{10} - (m_{Qi} z + n_{Qi}) \frac{-Q_{corr}}{10} \quad (11)$$

## 2.5 接触位置連続測定手法

前節の提案手法を、実車両を用いた走行試験時に適用する場合について検討した。走行試験時における接触位置の求解手順を図10に示す。同図では、走行試験中に得られる測定データを青枠、校正で得られる接触変数など、走行試験前に得られるデータを緑枠で囲んでいる。

走行試験前には、校正により接触変数や新連続法の重み付け関数を得るほか、低速走行試験により補正した新連続法の重み付け関数を取得する。また車輪踏面形状も予め測定しておく。

走行試験中には、各ブリッジ出力ならびに車輪回転角を同期測定する。得られたブリッジ出力測定値に対しては基線補正するための遮断周波数0.1Hzのローパスフィルタ処理（以下、LPF処理）値による減算処理を行った後、新連続法により接触力を算出するとともに連続推定式を用いて仮接触位置を求解する。そして仮接触位置を用いて補正した接触力を用いて補正接触位置を求解する。最後に、各種測定値に対して100HzのLPF処理値を出力する。

なお、連続推定式の求解時は、解の探索範囲を、接触位置が実際に取り得る-57mm～51mm（図8参照）に設定し、範囲外の解が得られた場合、本件では暫定処理として直前の求解結果を参照して、0mm以上で

あれば 51mm, それ以外は-57mm に解を置き換えた。また, 現状では測定終了後にオフラインで接触位置を求解しており, リアルタイム処理化が今後の課題である。

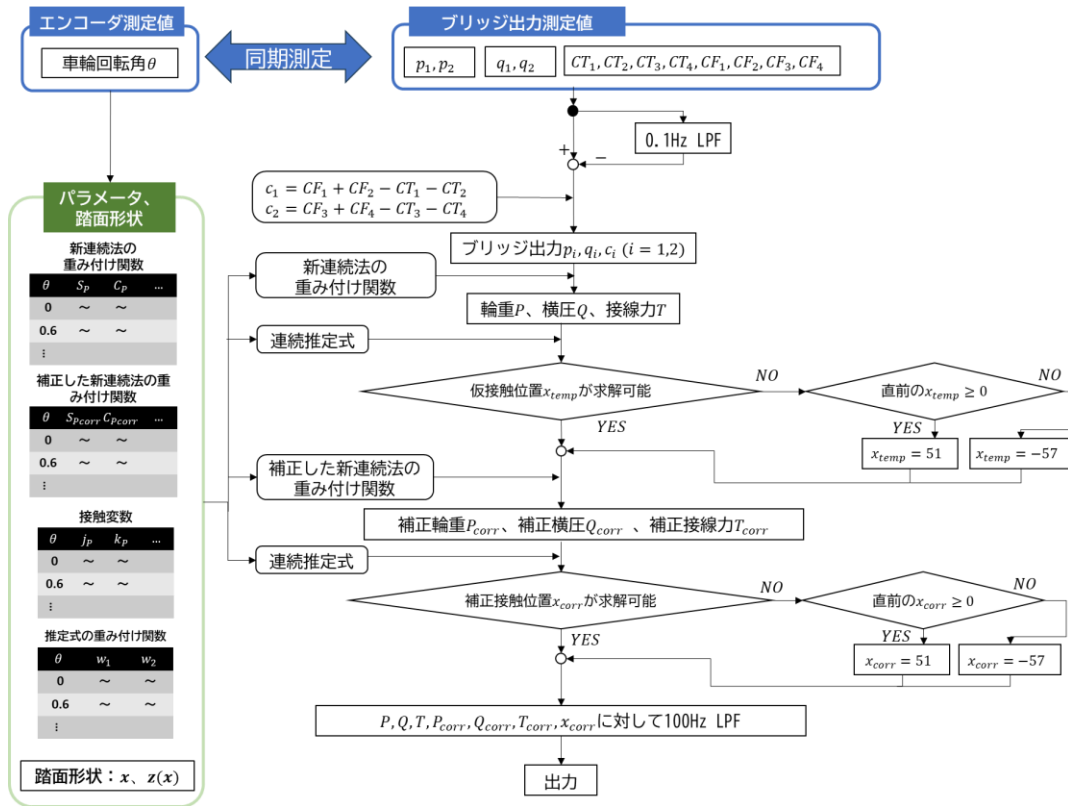


図 10 走行試験時における接触位置の求解手順

### 3. 実車両を用いた走行試験による妥当性検証

#### 3.1 試験条件および測定項目

図 10 で示した接触位置連続測定手法の妥当性を検証するため, 鉄道総研の所内試験線 (曲率半径 160 m および 100m の 2 曲線で構成) にて, 車輪がレールに乗り上がる条件を含む接触位置測定試験を実施した。供試車両は鉄道総研所有の在来線試験車両 (軸重約 80kN) で, 進行方向第 1 軸に接触位置測定用 PQ 軸を組み込んだ (図 11(a))。車両条件は, 通常空車状態 (以下, 通常条件) と, 軸ばねライナー量や LV 棒長さの調整によって外軌側輪重が小さくなるように 50% 程度の輪重アンバランスを設けた状態 (以下, アンバランス過大条件) の 2 種類とした。主な測定項目は, 内外軌の各種ブリッジ出力と, 車輪回転角, カメラ映像 (HD 画質, 30fps) である。同 PQ 軸では片側車輪につきブリッジを 12 回路 (計 48 極) 構成していることから, 新連続法用エンコーダ付スリップリング (20 極) ではエンコーダパルスのみを取得し, ブリッジ出力はすべて無線送受信機を用いて測定した (図 11(a))。また, 車輪回転角はエンコーダパルスのカウントをアナログ出力に変換して, 同無線機にて同期測定した。無線機のサンプリング周波数は 1024Hz とした。カメラは車輪後方において, 台車枠から伸ばした治具に取り付けた。進行方向前側の台車枠には, 後述の塗料噴射で使用する塗料噴射装置を取り付けた (図 11(b))。

試験前後に測定した車輪踏面形状は設計形状と一致したことから, 本件では設計形状における踏面座標を用いて接触位置を求解した。以下では, 内外軌の測定値に対してそれぞれ「A」, 「B」を付記して区別する。



図 11 所内走行試験時の仮設状況

### 3.2 通常条件における接触位置測定例

通常条件で最高速度 30km/h で走行した際における接触位置測定波形を試験線の線形とともに図 12 に示す。図 12(a), (b)がそれぞれ外軌, 内軌の測定波形, 図 12(c)が R160 曲線中における外軌側の拡大波形を示している。図 12(a)に示すように, 曲線通過中の補正接触位置 (図中の黒線) には急曲線走行に伴う車輪/レール接触位置の前後方向の移動や, 校正時における接触変数の測定誤差に起因すると考えられる  $\pm 5\text{mm}$  程度の周期的変動が認められた。この変動は車輪一回転 (約 2.5m) 周期で認められたが, カメラ映像では車輪/レールの相対位置に顕著な変化は認められなかったことから, 同変動は実現象とは異なると考えられる。このため, 図 12 ではウィンドウ幅 2.5m の中心化移動平均処理により同変動を除去した波形 (下付き文字 mov を付記。以下, 移動平均接触位置) を赤線で併せて示している。補正接触位置は, 試験区間で連続的に得られており, 曲線では外軌側がフランジ方向, 内軌側が反フランジ方向へ移動していることが確認できた。また, 25m 周辺の片開き分岐は背向で基準線側を, 150m 周辺の片開き分岐は対向で分岐線側を通過しており, いずれも補正接触位置はクロッシング通過時に急峻に変動した。なお, 内軌側の 200m ~ 240m 付近では周辺と比較して接触位置が反フランジ側となっているが, これは当該区間では摩耗した 50PS レールが使用されており (他区間は 50N レール), 接触状態が異なっていたことが要因と考えられる。

一方, 移動平均接触位置は, クロッシング通過時の急峻な変動は確認できないものの, 軌道変位による緩

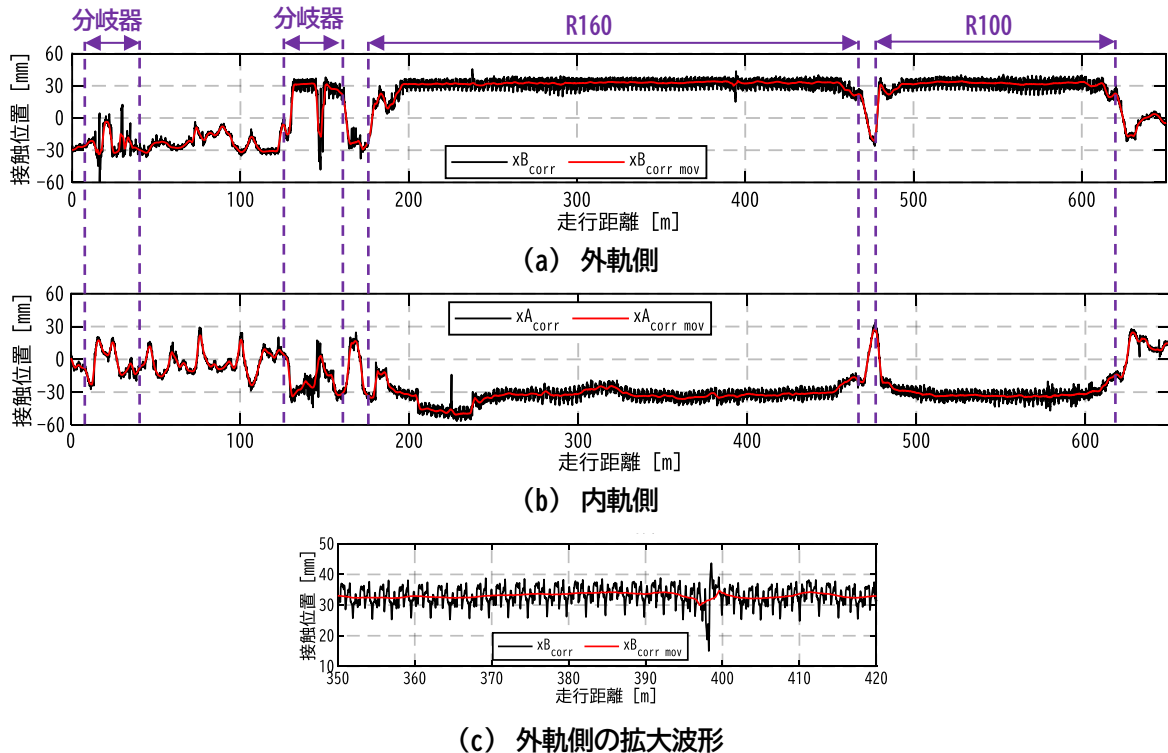


図 12 通常条件における接触位置測定波形

やかな接触位置変化は確認可能で、補正接触位置に認められた周期的変動は除去されていた。

各曲線通過中の外軌側移動平均接触位置は 32mm 程度で推移し、400m 付近のレール継目近傍（図 12(c) 参照）や 600m 付近（R100 の出口側緩和曲線内）においても最大 35mm と、いずれもフランジのど部での接触にとどまった。なお、直線区間における接触位置変化は、軌道変位によるものと考えられる。

### 3.3 開発手法の妥当性検証

車輪踏面に吹き付けた塗料が、レールとの接触により剥離した範囲をカメラ画像から読み取ることで走行中の接触位置を連続的に直接測定し、移動平均接触位置と比較することで開発手法の妥当性を検証した。ここで、開発手法では車輪／レールの接触面内における荷重中心位置が得られる一方で、塗料による接触位置の直接測定では塗料の付着領域と剥離領域の境（以下、剥離座標）しか得られないため、フランジ側と反フランジ側の剥離座標間での位置が荷重中心となっているかを連続的に特定するのは難しい。そこで、本件では各剥離座標、および剥離座標間の中心（以下、接触中心）と移動平均接触位置を比較した。なお、剥離座標は、カメラ画像を 2 値化処理し、塗料の付着領域と剥離領域の境をプログラムにより自動探索することで取得した。比較区間は塗料剥離が明瞭となる曲線中とした。

図 13 に外軌側の剥離座標を、同時に測定した移動平均接触位置とともに示す。アンバランス過大条件にて、走行速度を約 5km/h とし、外軌側車輪に初めて塗料噴射を行ったときの結果で、同図で示した剥離座標は 2.5m の移動平均処理値である。なお、同測定では沿線の草木により一時的に遮られたことで剥離座標の探索に失敗する画像（フレーム）が認められたため、図 13 では同フレームの直前直後のフレームでの剥離座標の平均値で代用した結果を示している。190m や 470m 付近など一部の箇所で乖離が認められたものの、移動平均接触位置はほとんどの区間で剥離座標間に存在していたことから、本手法は妥当であると考えられる。なお、190m や 490m 付近での乖離はフランジ部と踏面部での 2 点接触、470m や 600m 付近での乖離は、塗料の剥離が十分でなかったことによる誤検知によるものである。

図 14 に外軌側における接触中心と移動平均接触位置の関係を示す。剥離座標の誤検知や 2 点接触があった区間を除いて評価するため、図 13 の概ね 210m～460m 区間、および 510m～590m 区間で結果を示している。接触中心に対して移動平均接触位置は概ね ±2mm の範囲内で分布したことから、本試験における移動平均接触位置のまくらぎ方向の測定精度は ±2mm 程度であったと考えられる。

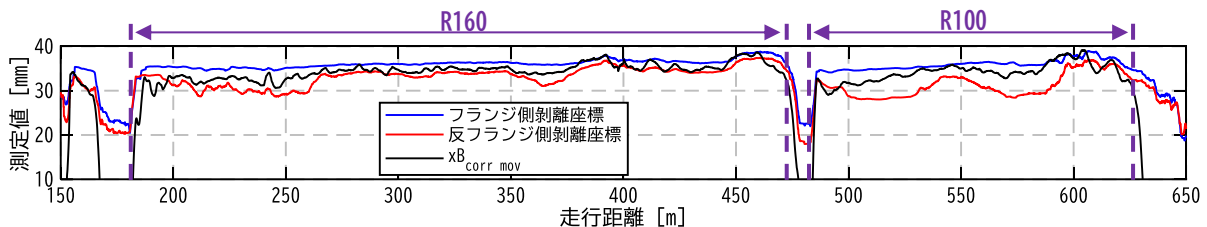


図 13 外軌側の剥離座標と移動平均接触位置

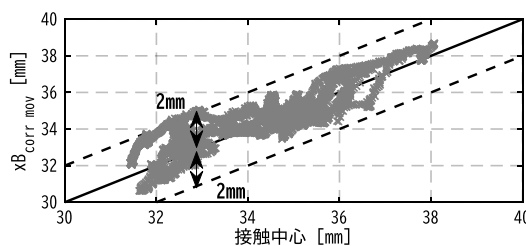


図 14 接触中心と移動平均接触位置の関係

### 3.4 乗り上がり発生時の接触位置測定例

アンバランス過大条件ならびに通常条件で走行した際における、外軌側の接触高さを図 15 に示す。接触高さは移動平均接触位置と車輪踏面座標から算出しており、フランジ直線部に相当する範囲（ $z \approx 10\text{mm} \sim 19\text{mm}$ ）を塗りつぶして示した。接触高さは通常条件では 400m 付近にて最大 8mm 程度とフランジ直線部に達していないものの、アンバランス過大条件では 250m 付近からフランジ直線部での接触を始め、R160 では完全には乗り上がらなかったものの、R100 の出口側緩和曲線内（595m 付近）では車輪がレールに完全に乗り上がった。

以上のように、開発手法により車輪がレールに乗り上がる場合でも接触位置を測定できることがわかった。また、接触高さを用いて乗り上がりの危険性を直接確認できる可能性があることがわかった。

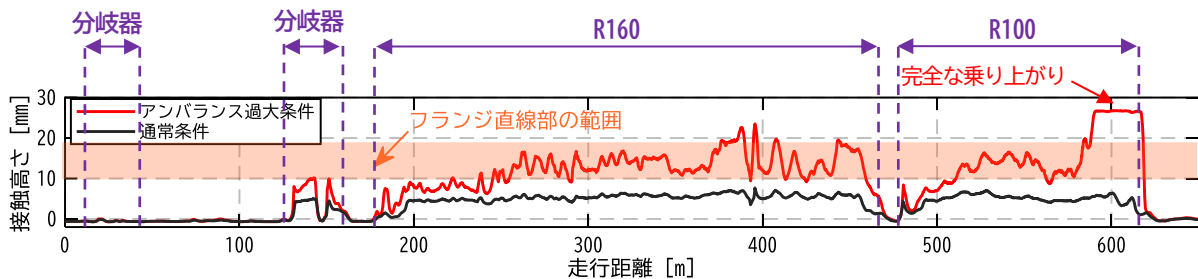


図 15 接触高さの測定例

## 4. まとめ

本研究では荷重とブリッジ出力の関係から得られるパラメータなどで構成される非線形方程式を解くことを特徴とする車輪／レール接触位置の連続測定手法を開発し、その妥当性を所内走行試験にて確認した。

今後は移動平均処理前における接触位置測定値の精度向上に取り組むとともに、開発手法による接触位置測定値を活用した乗り上がり脱線の影響因子解明を進め、将来的には接触位置情報を用いた新たな走行安全性評価手法の開発に取り組む予定である。

## 文献

- 1) 鉄道総合技術研究所編，運輸省鉄道局監修：在来鉄道運転速度向上試験マニュアル・解説，1993
- 2) 事故調査検討会：帝都高速度交通営団 日比谷線中日黒駅構内列車脱線衝突事故に関する調査報告書，2000
- 3) 野口芳直：ひずみゲージを用いた車輪／レール接触位置測定手法の検討，電気学会論文誌 D（産業応用部門誌），Vol.141, No.3, pp.1-8, 2021
- 4) 野口芳直，錦織大幸：ひずみゲージによる車輪／レール接触位置の連続測定手法の検討，日本機械学会論文集，Vol.90, No. 935, 2024
- 5) 野口芳直，錦織大幸，小林尊仁，川越夏樹：車輪曲げひずみを用いた車輪／レール接触位置の連続測定手法（実車両を用いた乗り上がり時を含む接触位置測定手法の妥当性検証），日本機械学会論文集，Vol.91, No. 951, 2025
- 6) 石田弘明，植木健司，深沢香敏，手塚和彦，松尾雅樹：輪重，横圧，脱線係数連続測定装置の開発，鉄道総研報告，Vol. 7, No. 8, pp.25-32, 1993

### 新幹線高速走行区間を対象とした 累積損傷度理論による路床沈下量の推定

伊藤 壱記\* 桃谷 尚嗣\*\* 景山 隆弘\*\*\*  
中村 貴久\* 川中島 寛幸#

#### Estimation of Subgrade Settlement Using Cumulative Damage Theory in High-Speed Sections of the Shinkansen

Kazuki ITO Yoshitsugu MOMOYA Takahiro KAGEYAMA  
Takahisa NAKAMURA Hiroyuki KAWANAKAJIMA

To ensure operational safety and maintainability of railway systems, subgrades supporting slab tracks are required to effectively mitigate settlement. Furthermore, a reliable model for estimating subgrade settlement is essential to enable higher train speeds. In this study, a calculation model for cumulative settlement was developed based on the cumulative damage theory. A full-scale loading test taking into account the effect of train speed was conducted, and the predicted cumulative settlement was compared with the observed results to validate the proposed approach.

キーワード：累積損傷度理論，路床，沈下量，有限要素解析

## 1. はじめに

山陽新幹線（岡山-博多間）以降に建設された新幹線の軌道では，施工の速度が速く，軌道保守の省力化が可能なスラブ軌道が主流となっている。スラブ軌道は，レール，レール締結装置，軌道スラブおよびん充層等で構成されており，レール締結装置とてん充層で高低変位を矯正できる。しかし，これらの調整量には限界があり，スラブ軌道を支持する構造物に塑性沈下が生じると大規模な補修が必要となる。このため，東北新幹線（東京-盛岡間）および上越新幹線（大宮-新潟間）までの新幹線においては，基本的には高架橋およびトンネル区間を除いて盛土や切土等の土構造物上にスラブ軌道は適用されてこなかった。しかしながら，施工や保守の効率化のため，土構造物上についてもスラブ軌道を適用することが求められていた。

そこで，1987年から鉄道建設公団（現，鉄道建設・運輸施設整備支援機構）と鉄道総合技術研究所において開発<sup>1)</sup>が進められたのが，図1に示す「A形スラブ軌道（以下，スラブ軌道）用のコンクリート路盤」である。コンクリート路盤は，鉄筋コンクリート版（層厚 300mm）と粒度調整碎石層（層厚 150mm）を組み合わせた構造である。盛土上におけるスラブ軌道に対する繰返し載荷試験等による検討により，コンクリート路盤を支持する路床（路盤表面から深さ 3m までの範囲）の地盤反力係数  $K_{30}$  値が  $110\text{MN/m}^3$  以上である条件において，列車荷重による沈下を十分小さく抑えられ，土構造物上でも問題なくスラブ軌道を適用できることが確認された<sup>1)</sup>。これにより，北陸新幹線（高崎-長野間）以降の土構造物上にスラブ軌道が適用されている。

最近では，トンネル発生土等の盛土材料への適用に関する検討や列車速度の向上が盛土に与える影響の検討が実施されており，盛土の沈下量を推定する手法が求められている。「鉄道構造物等設計標準・同解説

\* 軌道技術研究部 軌道・路盤研究室  
\*\* 軌道技術研究部  
\*\*\* 軌道技術研究部 軌道・路盤研究室（現 総務部）  
# 独立行政法人鉄道建設・運輸施設整備支援機構

(土構造物)<sup>2)</sup>」(以下、土構造標準)の付属資料には、累積損傷度理論に基づく累積沈下量を推定する手法<sup>3)</sup>が記載されているものの、その妥当性の検証については実施されていなかった。

そこで、本研究では解析および実物大試験を行い、累積損傷度理論を用いた累積沈下量の推定方法の妥当性を検証することとした。土構造標準では、列車速度による輪重変動を考慮する場合、列車が静止した状態の軸重(以下、静止軸重)に対して速度に応じた衝撃係数を乗じた値を列車荷重として用いることが望ましいとされている。本研究では、この考え方にに基づき、衝撃荷重を考慮した静的解析による応答値の算定を想定した。まず、有限要素法による線形過渡応答解析から得られた列車速度と路床に生じるひずみの関係に基づき、列車速度に応じた衝撃係数を評価した。次に、現行の土構造標準に従って構築した路床およびコンクリート路盤の実物大模型に対する繰返し載荷試験(以下、実物大載荷試験)を行った。載荷条件の設定にあたっては、線形過渡応答解析で求めた路床に生じる動的応答を考慮した。さらに、累積損傷度理論と静的線形解析をハイブリットさせた推定方法<sup>3)</sup>により実物大載荷試験で生じる累積沈下量を推定し、実物大載荷試験で得られた累積沈下量と比較してその妥当性を検証した。最後に、妥当性を検証した累積沈下量の推定方法により、新幹線の速度 260km/h および 360km/h における供用 100 年で生じる沈下量を求め、列車速度が沈下量に与える影響を評価した<sup>4)</sup>。

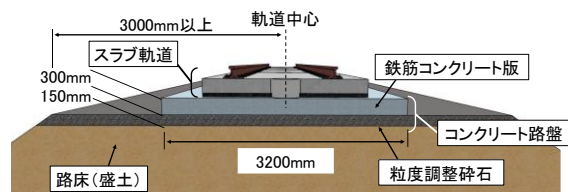


図1 A形スラブ軌道用のコンクリート路盤の構造

## 2. 列車の高速走行時における動的応答の評価

### 2.1 解析方法

実物大載荷試験を行うにあたり、盛土上のスラブ軌道を高速で列車が走行する際に生じるコンクリート路盤下の路床の動的な鉛直ひずみを三次元線形過渡応答解析により求め、得られた解析結果に基づいて実物大載荷試験の載荷荷重を設定した。新幹線の速度は 260km/h および 360km/h とした。なお、列車速度 260km/h は整備新幹線に対応する速度、列車速度 360km/h は国内で想定される最高速度である。

図2に載荷荷重の検討に用いた解析モデルおよび物性値を示す。静止軸重は170kN(標準列車荷重H-175)とした。解析モデルにおける盛土の層構成は、路盤表面から深さ 3m までの路床と、深さ 3m~10m の下部盛土の2層とした。解析モデルの寸法は、軌道長手方向を50m、軌道横断方向を25m(1/2 対称断面)とした。

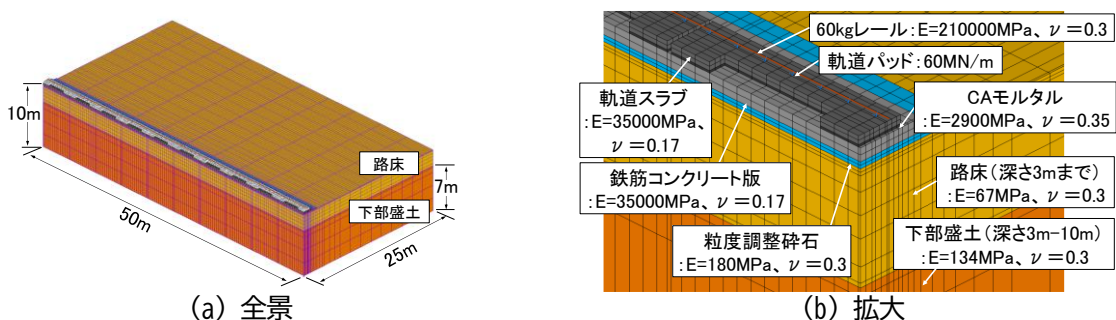


図2 載荷荷重の検討に用いた解析モデル (1/2 対称断面)

### 2.2 線形過渡応答解析による列車速度と応答値の関係

三次元線形過渡応答解析では、列車走行によって生じる路床の動的な鉛直ひずみを評価するため、レール上の節点に列車編成を考慮した連行荷重を与えた。作用させた軸数は、標準列車荷重 H-17 の軸配置で 17 両編成分の 68 軸とした。図 3 に隣接する 2 台車分の軸配置および路床の鉛直ひずみの評価位置を示す。

図 4 に、三次元線形過渡応答解析における車軸 1 軸に対するレール上の節点への入力荷重の設定方法を示す。各節点に与える荷重の入力波形は、車軸が隣接する節点の位置に到達した時点で立ち上がり、当該の節点上で所定の片レールあたりの荷重 (85kN) となる。延長 50m のレール上に 100mm 間隔で配置したすべての節点に対して、この入力波形を適用した。図 5 に入力波形によってレール上の節点に生じる列車速度 360km/h に対する列車荷重を示す。図 6 に列車速度 360km/h における路床表面の鉛直応力の時刻歴波形を示す。同図より、路床表面の鉛直応力には台車毎にピークが発生していることが確認された。

本研究では、コンクリート路盤を構成する鉄筋コンクリート版の設計で用いられている式(1)に示す衝撃係数の算定式を用いた。式(1)は、動的シミュレーションから求まる動的応答で決定する係数である衝撃係数  $i_a$  と、式(2)により算出される軌道の不整に伴う車両動揺に関する係数である衝撃係数  $i_c$  から構成される。速度効果の衝撃係数  $i_a$  は、静止輪重で生じるひずみに対する各列車速度で生じるひずみの増加率とした。表 1 に、三次元線形過渡応答解析で求めた軌道スラブ端部、軌道スラブ中央部および鉄筋コンクリート版目地部における路床表面に生じる鉛直ひずみと衝撃係数  $i$  を示す。式(1)は、元々、橋梁を設計する際の衝撃係数の算定式であり、部材のスパン長  $L_b$  を設定する必要がある。車両動揺に関する係数である衝撃係数

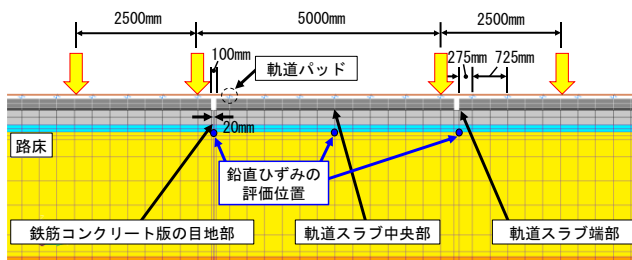


図3 隣接する2台車分の軸配置および路床の鉛直ひずみの評価位置

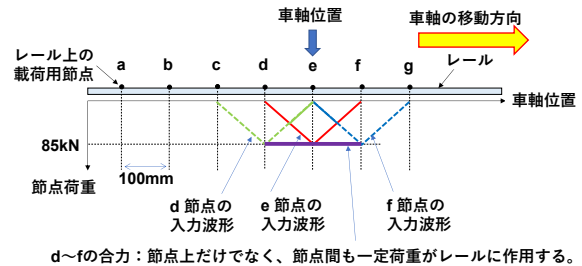


図4 荷重の入力波形のイメージ

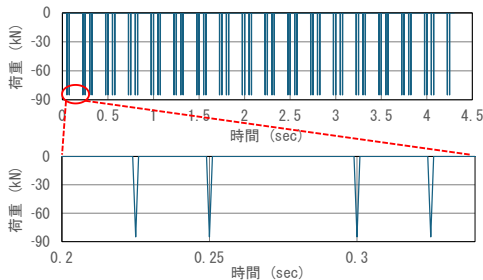


図5 360km/h 時の片レールあたりの列車荷重

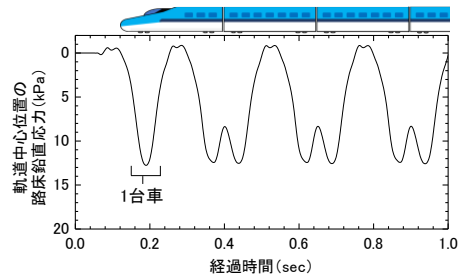


図6 360km/h 時における路床に作用する鉛直応力

表1 路床表面に生じる鉛直ひずみおよび衝撃係数  $i$

速度 (km/h)	路床表面の鉛直ひずみ				静的解析の鉛直ひずみに対する比率				速度効果 $i_a$	車両動揺 $i_c$	設計衝撃係数 $i$
	スラブ端部	スラブ中央	鉄筋コンクリート版目地部	3箇所平均	スラブ端部	スラブ中央	鉄筋コンクリート版目地部	3箇所平均			
静的	0.000195	0.000185	0.000277	0.000219	1.000	1.000	1.000	1.000	—	—	—
260	0.000230	0.000199	0.000347	0.000258	1.179	1.075	1.251	1.168	0.17	0.15	0.35
360	0.000235	0.000196	0.000369	0.000267	1.207	1.061	1.331	1.200	0.20	0.15	0.38

$i_c$ については、本検討で対象とする構造を踏まえ、橋梁と同じようには部材のスパン長を定義できないことから、安全側の設定となるよう、部材のスパン長  $L_b$  を 0m として  $i_c$  が最も大きくなる条件とした。

$$i = (1 + i_a)(1 + i_c) - 1 \tag{1}$$

$$i_c = \frac{10}{65 + L_b} \tag{2}$$

三次元静的線形解析における各箇所の鉛直ひずみを 1 とした場合、列車速度 260km/h ではスラブ端部で 1.179 倍、スラブ中央で 1.075 倍、鉄筋コンクリート版目地部で 1.251 倍であった。鉄筋コンクリート版目地部の間隔が最大で 60m であることを踏まえ、3 箇所の平均倍率の増加分である 0.17 ( $\doteq 1.168-1.00$ ) を速度効果  $i_a$  とし、部材のスパン長  $L_b$  を 0m とした車両動揺  $i_c$  の 0.15 から式(1)を適用して、列車速度 260km/h における衝撃係数  $i$  を求めると 0.35 となる。同様の方法で、列車速度 360 km/h における衝撃係数も求めると 0.38 となる。

### 3. 実物大载荷試験による路床の沈下特性の評価

#### 3.1 実物大模型の寸法の設定

実物大载荷試験では、試験土槽（幅 3.5m、長さ 7.0m、深さ 2.5m）の寸法の制約上、有限長の鉄筋コンクリート版に対して定点载荷を行う必要があるため、三次元静的線形解析により、実軌道で生じる路床表面の鉛直応力と一致するように鉄筋コンクリート版の軌道長手方向の寸法を設定した。鉄筋コンクリート版の軌道横断方向の寸法は土構造標準に示されている 3.2m とした。なお、軌道スラブおよび CA モルタルに生じる変形の影響を除外するため、実物大模型（路床）上の鉄筋コンクリート版に対して試験装置で直接载荷して路床の沈下特性を評価した。

図 7 に実物大模型の寸法と一致させた解析モデルを示す。図 8 に示す三次元静的線形解析の結果から、鉄筋コンクリート版の軌道長手方向の寸法を 2.3m とした。

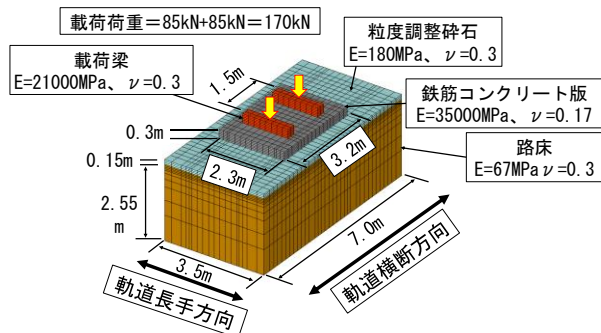


図 7 実物大模型の解析モデル

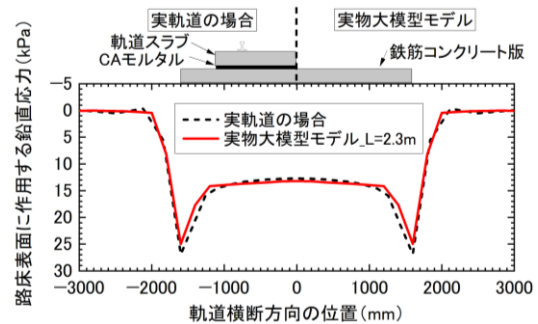


図 8 路床表面の鉛直応力の比較

#### 3.2 実物大模型の構築

構築した実物大模型の寸法を図 9 に示す。土構造標準<sup>2)</sup>に記載されているコンクリート路盤を支持する路床の締固め管理値に準拠して、実物大模型に用いる路床の締固め度を 95% 以上、かつ  $K_{30}$  値を  $110\text{MN/m}^3$  以上とした。路床材には、笠間砂を用いた。路床の構築後、路床表面において直径  $\phi 300\text{mm}$  の载荷板による平板载荷試験を実施した結果、 $K_{30}$  値は  $122.7\text{MN/m}^3$  であった。なお、コンクリート路盤を構成する粒度

調整碎石層については、最適含水比に調整した粒度調整碎石（M-40）を使用し、土構造標準に準拠して締め固め度 95%で締め固めた。

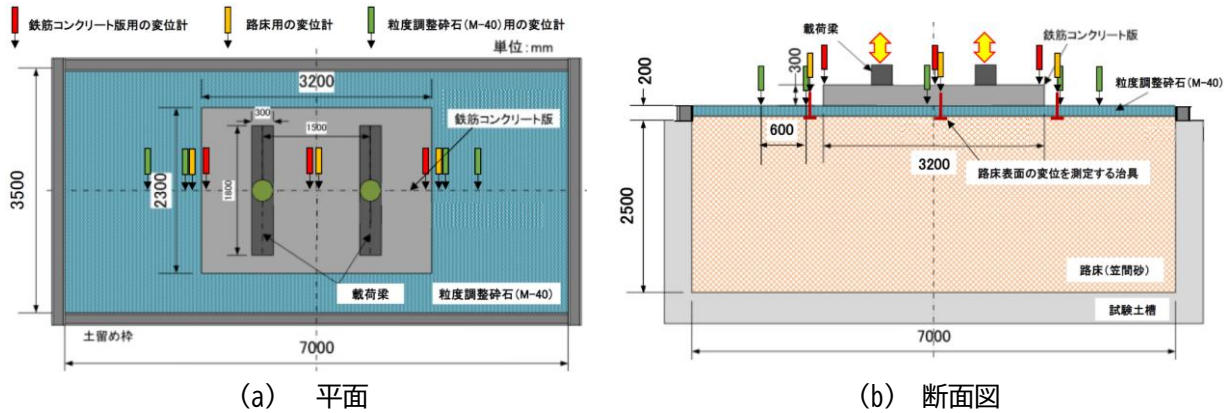


図9 実物大模型の寸法

### 3.3 実物大載荷試験の結果

荷重振幅は、2章で求めた列車速度 260km/h に対する衝撃係数  $i$  を用いて静止軸重 170kN を 1.35 倍 (1.00+0.35) した 230kN に設定した。これに基づき、載荷荷重は最小荷重 5kN，最大荷重 235kN とした。路床表面に作用する鉛直応力が台車毎の通過に応じて周期的に生じるため、載荷周波数は列車速度 260km/h における台車間距離 7.5m に相当する 9.6Hz とした。図 10 に除荷時における路床中央の沈下量と載荷回数との関係を示す。載荷回数 200 万回時の沈下量は 0.810mm であった。

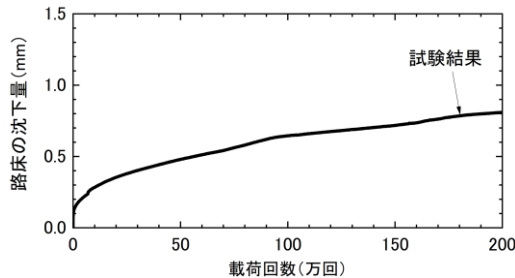


図 10 除荷時における路床中央の沈下量と載荷回数の関係

## 4. 路床の累積沈下量の推定

### 4.1 累積沈下量の推定方法の概要

土構造標準の付属資料に示されている文献 3 では、列車の繰返し載荷による盛土の累積沈下量を推定する手法として、路床材の繰返し三軸圧縮試験結果から累積沈下特性パラメータを設定し、累積損傷度理論<sup>3)</sup>と二次元有限要素解析をハイブリットさせた方法が提案されている。ここで、累積損傷度理論とは、盛土材料のせん断剛性を低下させて、繰返し荷重載荷時の盛土の弾塑性変形を評価する方法である。

本研究でも、累積損傷度理論により、盛土材料の累積沈下特性を算定する。具体的には、累積沈下特性パラメータに基づいて盛土材料の見かけ上のせん断剛性を低下させ、低下後のせん断剛性から算出した弾性係数を二次元有限要素解析における路床モデルを構成する各要素に対して設定し、繰返し列車荷重による累積沈下量を評価する。

路床の累積沈下量の推定フローを図 11 に、累積損傷度理論で用いる軟化せん断弾性係数  $G^*$  とせん断ひずみ  $\gamma$  の関係を図 12 に示す。まず、図 11 に示した手順 1 では、繰返し三軸圧縮試験から得られたひずみと繰返し回数の関係をフィッティングできる近似曲線を作成する。この近似曲線および試験条件より累積沈下特性パラメータ  $a_2$  および  $m$  を設定する (図 12)。

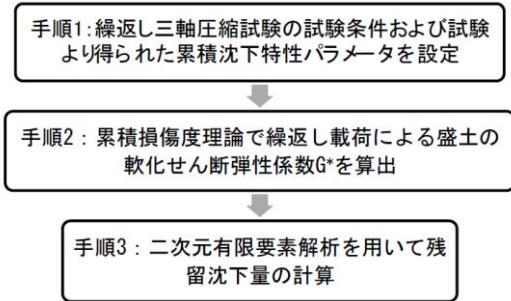


図 11 累積沈下量の推定フロー

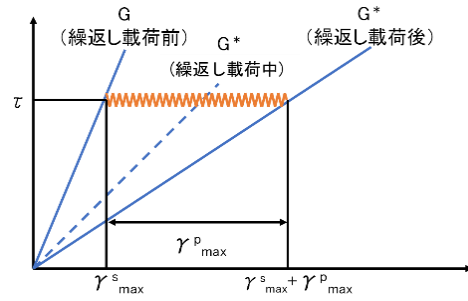


図 12 軟化せん断弾性係数とせん断ひずみの関係

次に、手順 2 では、手順 1 で設定した累積沈下特性パラメータの他、繰返し荷重で生じるせん断応力 (繰返しせん断応力) と繰返し回数等を用いて、式(3)より累積ひずみ  $\varepsilon_1^p$  を算出する。

$$\varepsilon_1^p = (SR_d/a_1)^{1/a_2} N^m \tag{3}$$

ここに、 $a_1$  は初期せん断応力比に応じて定まるパラメータ、 $a_2$  および  $m$  は繰返し三軸試験で定まる累積沈下特性パラメータ、 $N$  は繰返し载荷回数、 $SR_d$  は繰返し载荷によるせん断応力比である。

式(3)に示した  $SR_d$  の算定には、式(4)を用いる。なお、式(4)には、二次元の有限要素解析モデルに対して列車荷重を作用させる構造解析から求まる最小主応力  $\sigma_{3,c}$  と最大主応力  $\sigma_{1,c}$  を用いる。また、二次元の有限要素解析モデルに対する自重沈下解析から求まる最小主応力  $\sigma_{3,0}$  と最大主応力  $\sigma_{1,0}$  を用いる。

$$SR_d = \frac{\tau_d}{\sigma_m} = \frac{(\sigma_{1,c} - \sigma_{3,c}) - (\sigma_{1,0} - \sigma_{3,0})}{2} / \left[ \sigma_{3,0} + \left( \frac{\sigma_{1,0} - \sigma_{3,0}}{2} \right) \right] \tag{4}$$

式(3)に示した  $a_1$  の算定には式(5)を用いる。

$$a_1 = \begin{cases} 0.2 & \text{if } SR_{d,max} < 0.5 \\ SR_{d,max} - 0.5 & \text{if } SR_{d,max} \geq 0.5 \end{cases} \tag{5}$$

式(5)に示した最大繰返し载荷によるせん断応力比  $SR_{d,max}$  の算定には、式(6)～式(8)を用いる。

$$SR_{d,max} = SR_{s,max} \left[ 1 + 0.5 \sqrt{1 - (SR_s/SR_{s,max})^2} \right] - SR_s \tag{6}$$

$$SR_{s,max} = \tau_{f,0}/\sigma_m = \left( \frac{\sin \phi}{1 - \sin \phi} \sigma_{3,0} + \frac{\cos \phi}{1 - \sin \phi} c \right) / \left[ \sigma_{3,0} + \left( \frac{\sigma_{1,0} - \sigma_{3,0}}{2} \right) \right] \tag{7}$$

ここに、 $SR_s$  は初期せん断応力比、 $SR_{s,max}$  は最大せん断応力比、 $\tau_{f,0}$  は最小主応力  $\sigma_{3,0}$  の時の最大せん断応力、 $\phi$  は内部摩擦角、 $c$  は粘着力である。

式(6)に示した  $SR_s$  の算定には、式(9)を用いる。

$$SR_s = \tau_{max}^s / \sigma_m = \frac{(\sigma_{1.0} - \sigma_{3.0})}{2} / \left[ \sigma_{3.0} + \left( \frac{\sigma_{1.0} - \sigma_{3.0}}{2} \right) \right] \quad (8)$$

ここに、 $\tau_{max}^s$ は最大初期せん断応力である。

次に、式(3)の $\varepsilon_1^p$ を式(9)に代入して累積せん断ひずみ $\gamma^p$ を算定し、 $\gamma^p$ を式(10)に代入して軟化せん断弾性係数 $G^*$ を求める。ここに、 $\nu$ はポアソン比である。

$$\gamma^p = (1 + \nu)\varepsilon_1^p \quad (9)$$

$$G^* = G \frac{1}{1 + \left( \frac{\gamma_{max}^p}{\gamma_{max}^s} \right)} \quad (10)$$

最後に、手順3では軟化せん断弾性係数 $G^*$ を用いて、線路方向に直交する断面において平面ひずみ条件とした二次元静的線形解析から、列車走行による繰返し载荷後の路床の残留沈下量を算出する。

### 4.2 繰返し三軸圧縮試験

3章の実物大模型に用いた路床材(笠間砂)の繰返し三軸圧縮試験を実施した。試験条件は圧密排水条件、载荷周波数を1Hzとし、载荷回数は载荷初期に急進する沈下とその後の漸増する沈下の累積沈下特性を評価するために、過去の試験結果<sup>3)</sup>を考慮して20万回とした。供試体の端面の不整や不陸あるいは端面近傍のゆるみによるベッディングエラーの影響を受けないように、局所変位計装置(以下、LDT)<sup>6)</sup>から得られた鉛直ひずみを基に、図13に示したとおり、フィッティングにより累積沈下パラメータ $a_2$ および $m$ を設定した(表2)。

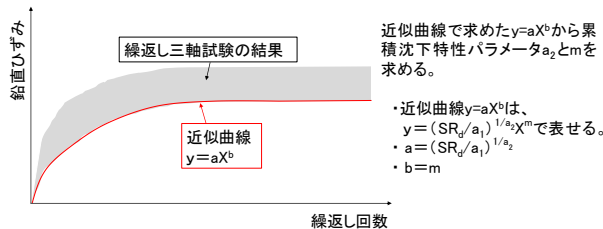


図13 累積沈下特性パラメータの設定方法

表2 試験条件および累積沈下特性パラメータ

背圧	初期有効拘束圧 $\sigma_r$ (kPa)	初期せん断応力 $\tau_g$ (kPa)	繰返しせん断応力 $\tau_d$ (kPa)	初期せん断応力比 $SR_g$	繰返しせん断応力比 $SR_d$	$a_1$	$a_2$	$m$
-20	20	6.25	6.25	0.238	0.238	5.045	0.497	0.231

### 4.3 路床の累積沈下量の推定

土構造標準の付属資料<sup>2)</sup>に示されている累積損傷度理論を用いた累積沈下量の推定では、前述した通り二次元静的線形解析が実施されている。二次元静的線形解析モデルを用いて、累積沈下量を精度良く推定するためには、軌道長手方向に対して分散する列車荷重の影響を考慮する必要がある。そこで、二次元静的線形解析では、三次元静的線形解析で得られる路床表面に生じる鉛直応力と同等となるように、列車荷重に補正係数を乗じた载荷荷重を設定した。図14に示す通り、二次元静的線形解析の载荷荷重は、列車荷重230kNに対して補正係数0.33を乗じた76kNとした。

図15に繰返し三軸圧縮試験で得られた累積沈下特性パラメータを用いた解析結果と「3.3 実物大载荷試

験の結果」に示した実物大載荷試験における路床の沈下量を示す。図 15 より、載荷回数 200 万回時における累積沈下量は、試験結果で 0.810mm、解析結果で 0.607mm となった。解析で得られた累積沈下量に対する実物大載荷試験の比率は 1.33 倍であった。実物大載荷試験の路床表面の変位は、図 9 中に示した治具を用いて間接的に測定しており、治具の設置精度や路床部の若干の緩み・不陸等によるベディングエラーの影響を受けた可能性がある<sup>7)</sup>。

上記の影響を考慮し、実物大載荷試験と解析結果の沈下量の比率を踏まえて、解析で推定した沈下量に 1.3 を乗じた値を用いて試験結果と比較した。その結果、載荷初期から 200 万回までの間において試験結果とほぼ等しくなった。

ここで、設計において路床の累積沈下量を過小評価しないよう、本研究では解析結果と試験結果の乖離を補正するために導入した 1.3 を基準とし、さらに軌道構造の性能照査で用いられる安全係数の考え方を取り入れて、算定した路床の沈下量よりも大きい沈下量を推定値とすることとした。具体的には、軌道構造の重要度や限界状態に到達した際の社会的影響を考慮するために設定される軌道構造係数  $\gamma_i$  (疲労破壊の照査では 1.1) を用い、1.3 に 1.1 を乗じた値 (1.43) よりも大きい 1.5 を算定した路床の沈下量に乗じた値を推定値とした。

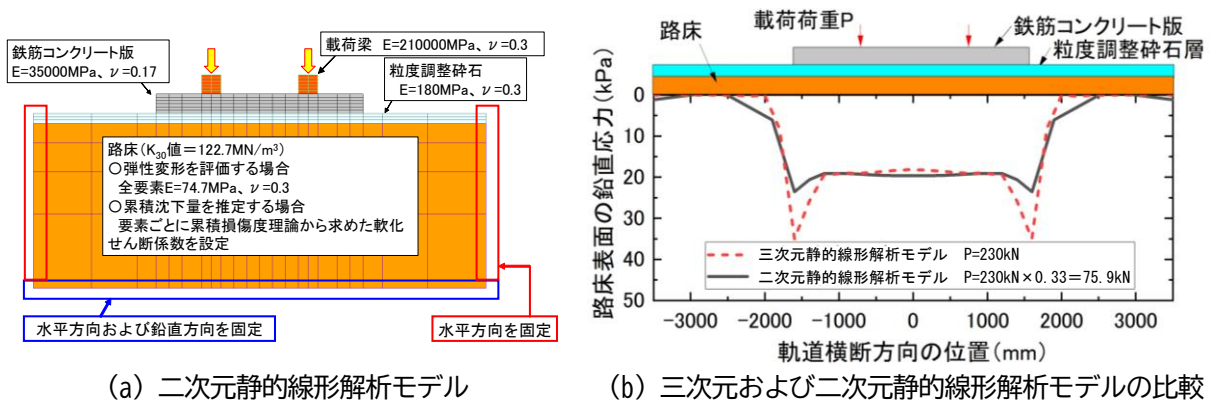


図 14 二次元静的線形解析モデルの載荷荷重の検討

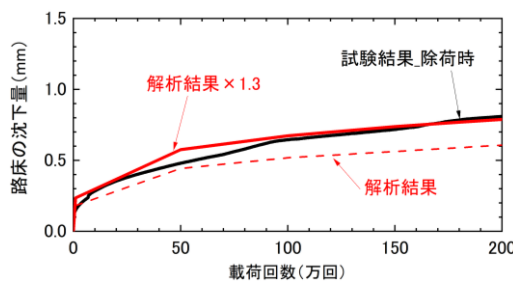


図 15 実物大載荷試験と解析結果の比較

## 5. 列車速度が盛土の累積沈下量に与える影響

### 5.1 解析モデルの条件

本推定手法の手順に従って、図 16 に示す高さ 9m の盛土の二次元解析モデルを用いて、国内で想定される最高速度 360km/h および整備新幹線に対応した速度 260km/h における盛土の累積沈下量を比較した。

表 3 に解析モデルの物性値を示す。CA モルタルの弾性係数は、現地の CA モルタルの圧縮強度が 1.8N/mm<sup>2</sup> 以上であった<sup>8)</sup> ことから、鉄道構造物等設計標準・同解説 軌道構造<sup>9)</sup>に示されている CA モルタルの弾性

係数を推定する式(11)より、施工性  $\alpha_1$ 、環境  $\alpha_2$  および温度  $\alpha_3$  の影響を表す係数をそれぞれ 1.0 と設定し、圧縮強度  $f'_m$  が 1.8N/mm<sup>2</sup> における値を参考に設定した。鉄筋コンクリート版は鉄道構造物等設計標準・同解説 コンクリート構造より設定した。路床および下部盛土には、実物大模型試験の路床で使用した笠間砂の  $K_{30}$  値および累積沈下特性パラメータを用いた。なお、下部路盤は、路床と同じ笠間砂の  $K_{30}$  値を用いたが、列車荷重作用時のひずみレベルが路床よりも小さくなるため、ひずみレベルに応じた弾性係数を設定することで盛土全体の変形を精度良く評価できる<sup>2)</sup>。そこで、下部盛土の弾性係数  $E_5$  は、 $K_{30}$  値 122.7MN/m<sup>3</sup> を用いて式(12)より求めた<sup>2)</sup>。

$$E_m = \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 * 700 * f'_m \tag{11}$$

$$E_5 = 1.218 \times K_{30} \text{ 値} \tag{12}$$

本解析では、3章に示した実物大載荷試験の結果を踏まえて、路床の層厚(2550mm)に対して粒度調整碎石の層厚(150mm)は薄いため、沈下量に与える影響は限定的であると判断した。このため、「路床の沈下量=鉄筋コンクリート版の沈下量」として評価した。鉄筋コンクリート版の沈下量は、盛土中央側に位置する鉄筋コンクリート版天端の隅角部における沈下量を採用した。

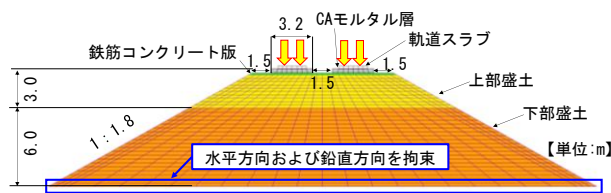


図 16 高さ 9m の盛土の二次元静的線形解析モデル

表 3 二次元静的線形解析モデルに用いた物性値

部材	弾性係数 E (N/mm <sup>2</sup> )	ポアソン比	密度 ρ (g/cm <sup>3</sup> )	備考
軌道スラブ	31000	0.17	2.45	
CAモルタル	1200	0.35	1.70	
鉄筋コンクリート版	25000	0.17	2.45	
粒度調整碎石層	180	0.30	2.00	
路床 ( $K_{30}$ 値=122.7MN/m <sup>2</sup> )		0.30	1.85	○弾性変形を評価する場合 全要素:74.7 ○累積沈下量を推定する場合 要素ごとに累積損傷度理論から求めた軟化せん断弾性係数を設定 路盤表面から深さ3mまで
下部盛土 ( $K_{30}$ 値=122.7MN/m <sup>2</sup> )		0.30	1.85	○弾性変形を評価する場合 全要素:149.4 ○累積沈下量を推定する場合 要素ごとに累積損傷度理論から求めた軟化せん断弾性係数を設定 路盤表面から深さ3m以深(下部盛土の範囲)

## 5.2 荷重条件

二次元静的線形解析モデルを用いた解析では、軌道長手方向の荷重分散を考慮した載荷荷重の設定が重要である。そこで、二次元静的線形解析では、三次元静的線形解析(図 17, 表 4)で得られる路床表面に生じる鉛直応力と同等となるように、列車荷重に補正係数を乗じた載荷荷重を設定した。

まず、軌道長手方向の範囲を決定するため、図 18 に鉄筋コンクリート版直下の路床表面に作用する鉛直応力の軌道横断方向に対する平均値および列車荷重(1台車分)に対する軌道パッドが受け持つ反力の割合を示す。同図より、軌道パッドが受け持つ反力の作用範囲は対称軸位置から 7.5m の延長であった。一方、載荷荷重の作用時における路床表面の鉛直応力の作用範囲は対称軸位置から 9.3m の延長であり、スラブ軌道およびコンクリート路盤によって載荷荷重が路床に広く分散されていることが確認された。

次に、二次元静的線形解析モデルでは、軌道長手方向の単位長さあたりの載荷荷重を設定する必要がある。鉛直応力の作用範囲(9.3m)を基準とすると、盛土の沈下量を過小評価する可能性があるため、反力の作用範囲(7.5m)を採用し、安全側の評価を行うこととした。以上より、二次元静的線形解析モデルの載荷荷重の影響範囲は、軌道長手方向の延長 15m(1台車あたり 7.5m)とした。

さらに、軌道長手方向の荷重分散を考慮すると、二次元静的線形解析モデルにおける軌道長手方向 1m あたりの載荷荷重は  $2 \times \text{静止軸重 } P_0 \div 7.5 = 0.267P_0$  (片レールあたりの載荷荷重は  $0.1335P_0$ ) となる。この載荷荷重  $0.267P_0$  の妥当性を検証するため、二次元解析モデルと三次元静的線形解析モデル(軌道長手方向の

延長 7.5m の平均値) における路床表面の鉛直応力を比較した (図 19) 。 図 19 に示す通り、二次元静的線形解析において、列車荷重 230kN に補正係数 0.267 を乗じた 61.4kN を載荷荷重として作用させた結果、三次元静的線形解析モデルにおける鉛直応力分布と概ね一致することを確認した。

本手法では上下線の載荷を分離および同時に載荷して、それぞれの載荷で生じる沈下量を累積する方法を提案するまで深度化できていないため、上下線の軌道スラブに対して同時に載荷した。そのため、実際の営業線よりも厳しい条件で評価していることになる。

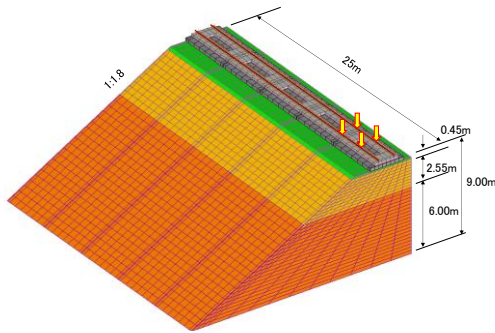


図 17 高さ 9m の盛土の三次元静的線形解析モデル (1/4 対称モデル)

表 4 三次元静的線形解析モデルに用いた物性値

部材	弾性係数E (N/mm <sup>2</sup> )	ポアソン比	備考
60kgレール	210000	0.30	
軌道パッド	—	—	ばね係数60MN/m
軌道スラブ	31000	0.17	
CAモルタル	1200	0.35	
鉄筋コンクリート版	25000	0.17	
粒度調整砕石層	180	0.30	
路床 (K <sub>30</sub> 値=122.7MN/m <sup>3</sup> )	74.7	0.30	路盤表面から深さ3mまで
下部盛土 (K <sub>30</sub> 値=122.7MN/m <sup>3</sup> )	149.4	0.30	路盤表面から深さ3m以深 (下部盛土の範囲)

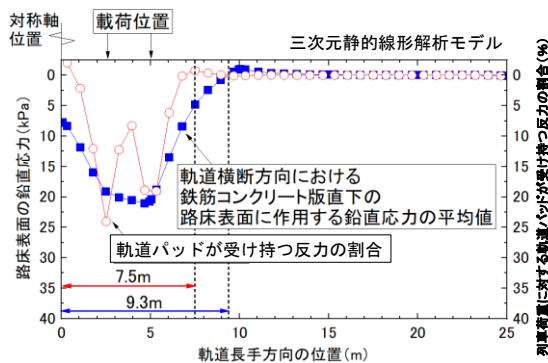


図 18 軌道長手方向の載荷荷重の影響範囲

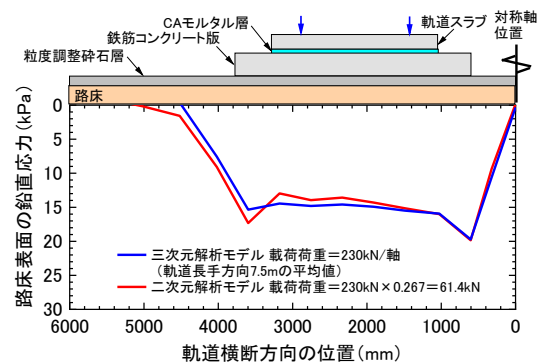


図 19 二次元静的線形解析モデルの荷重の補正係数の検討

### 5.3 沈下量の推定条件

推定条件は、軸重を 170kN、列車速度を 260km/h および 360km/h、列車本数を 10 両編成で 60 本/日 (年間の通過軸数は、87.6 万回) とし、供用中の 100 年間に於いて列車速度は一定とした。盛土の供用年数は、1 年、10 年、50 年、100 年の 4 種類とした。4 章の検討結果に基づき、累積損傷度理論と二次元有限要素解析をハイブリットさせた方法で算定した値に 1.5 を乗じることで路床の沈下量を推定した。列車による載荷回数は 2 章に示した走行時の路床表面の変位波形より 2 軸 (1 台車) で 1 回とした。

### 5.4 沈下量の推定結果

図 20 に鉄筋コンクリート版上面における、速度 260km/h および 360km/h の列車の繰返し通過で生じる沈下量の推定結果を示す。供用開始から 100 年後の沈下量は、列車速度 260km/h で 2.85mm、列車速度 360km/h で 2.99mm となった。列車速度が 360km/h で生じる沈下量は、列車速度が 260km/h の場合よりも沈下量が 5% 程度増加した。また、供用 100 年後の沈下量は 3mm 程度であり、土構造標準に示されているスラブ軌道用のコンクリート路盤の最終沈下量 30mm<sup>2</sup>) と比較しても十分に小さい値であった。

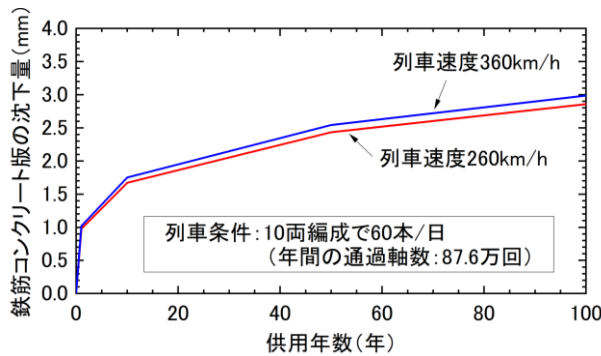


図 20 列車速度 260km/h および 360km/h で生じる沈下量の推定結果

## 6. まとめ

実物大載荷試験により、累積損傷度理論と静的線形解析をハイブリットさせた推定方法の妥当性を検証した。本検討で得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 盛土上のスラブ軌道上を列車が走行した際、速度効果による衝撃係数を考慮するため、三次元有限要素解析の過渡応答解析より、列車速度に応じた路床のひずみから求める設計衝撃係数  $i$  の設定方法を提案した。
- (2) 累積損傷度理論を用いた沈下量の推定結果と実物大繰返し載荷試験結果を比較した。その結果、LDTを用いて累積ひずみを測定した繰返し三軸圧縮試験結果から累積変形特性パラメータを決定し、有限要素解析により算出した沈下量を 1.5 倍することで、実物大繰返し載荷試験の結果を安全側に評価できることを確認した。
- (3) 高さ 9m の盛土上に敷設されたスラブ軌道に対して、列車が 1 日に 60 編成 (10 両編成) 通過する条件において、100 年分の列車の繰返し通過で生じるコンクリート路盤の累積沈下量を推定した。推定した累積沈下量は、列車速度 260km/h で 2.85mm、360km/h で 2.99mm であった。列車速度が 360km/h で生じる沈下量は、列車速度が 260km/h の場合よりも沈下量が 5% 程度増加した。土構造標準に示されているスラブ軌道用のコンクリート路盤の最終沈下量 30mm と比較しても十分に小さい値であった。

## 文 献

- 1) 安藤勝敏, 須長誠, 三浦重, 関根悦夫, 鬼頭誠, 青木一三: 土路盤上スラブ軌道用路盤の実用性に関する検討, 土木学会論文集, pp.87-98, No.536, 1996
- 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 土構造物, 丸善出版, 2013
- 3) 館山勝, 篠田昌弘, 堀井克己, 小島謙一: 列車の繰返し載荷による盛土の残留沈下量の算定方法, 鉄道総研報告, Vol.20, Vol.12, 2006
- 4) 伊藤孝記, 桃谷尚嗣, 景山隆弘, 中村貴久, 川中島寛幸: 累積損傷度理論による列車速度を考慮した新幹線盛土の塑性沈下量の評価, 土木学会論文集, Vol.79, No.7, 22-00265, 2023
- 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 コンクリート構造物, 丸善出版, 2004
- 6) Goto, S., Tatsuoka, F., Shibuya, S., Kim, Y., Sato, T.: A simple gauge for local small strain measurements in the laboratory, Soils and foundations, 31(1), pp.169-180, 1991.
- 7) 水野直也, 仲村治朗, 渡辺浩平, 斉藤一郎, 西尾伸也: 新第三紀常滑層地盤の変形特性, 土木学会論文集, No.603, III-44, pp.179-190, 1998.9
- 8) 高橋貴蔵, 桃谷尚嗣, 洲上翔太, 斉藤成彦: 軌道スラブの耐荷特性に基づくスラブ軌道でん充層の補修基準に関する研究, 構造工学論文集, Vol. 66A, 2020.3
- 9) 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 軌道構造, pp. 398-401, 丸善出版, 2012

# 曲線中のレールの疲労破壊に関する安全性の照査方法

細田 充\* 弟子丸 将\*

## Verification Method for Safety of Railway Rails Against Fatigue Failure Considering Application to Curved Tracks

Mitsuru HOSODA Tadashi DESHIMARU

This study examines the development of a safety verification method for rail fatigue failure in curved tracks. Specifically, we estimate rail stress using an FEM model simulating both rails on railway tracks and develop a method for estimating response values. In addition, we measure rail stress generated when a vehicle travels on a curve on an operating line and analyze the effect of lateral pressure on rail stress. We compare the measured results with the estimated rail stress to verify the validity of the estimation method.

キーワード：レール，安全性，疲労破壊，性能照査，横圧，曲線

### 1. はじめに

鉄道構造物等設計標準・同解説 軌道構造（以下，設計標準）<sup>1)</sup>によるレールの設計において，疲労破壊に関する安全性の照査（以下，疲労破壊の照査）を実施している。レールの疲労破壊の照査を行う際には，設計条件に応じた設計作用を定め，作用に対して発生するレール底部曲げ応力（以下，レール応力）から，設計耐用期間中の疲労破壊の有無を判断する。曲線では，車両重量を主とする鉛直方向の荷重である輪重とともに，車両走行時の遠心力等で水平方向（線路横断面方向）の荷重である横圧も併せてレールに作用する（図1）。このうち，横圧の影響によるレール頭側面の摩耗に起因して，レールが疲労破壊に至る前に摩耗量を指標としてレール交換が実施されることから，これまで曲線中のレールの疲労破壊の照査方法は確立されていなかった。

一方，近年低コストの軌道構造の構築を目的に，まくらぎ間隔を拡大し（図2），レール締結装置（以下，締結装置）やまくらぎ等の軌道を構成する部材の数量を削減する施策が実施されている<sup>2) 3)</sup>が，レールの支持間隔の拡大に伴いレールの曲げ応力が増大する。特に，前述した通り曲線では横圧の影響でさらにレール応力が大きくなることが想定され，疲労破壊の発生に対する影響を検討する必要がある。

本研究では，曲線中のレールの疲労破壊の照査方法の構築の一環として，左右両側レールを模擬したFEMモデルによってレール応力を推定し，応答値の推定方法を確立した。また，車両が曲線を走行した際に発生するレール応力を営業線で測定し，レール応力に対する横圧の影響を分析するとともに，レール応力の推定結果と比較し，推定手法の妥当性を検証した。

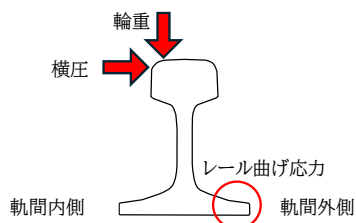
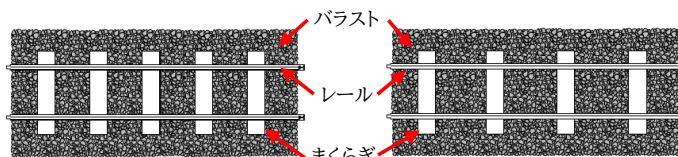


図1 輪重，横圧とレール応力



(a) 間隔拡大前

(b) 拡大後

図2 まくらぎ間隔拡大の概念

\* 軌道技術研究部 レールメンテナンス研究室

## 2. レールの設計作用の検討

### 2.1 曲線における変動横圧係数の検討

直線におけるレールの疲労破壊の照査に用いる作用については、軌道が一定レベルの状態に整備されている前提のもと、車両走行速度をパラメータとして算定する輪重変動分の割り増しを考慮している。在来線の直線および緩曲線の場合、ロングレール区間および中間部における輪重の作用では、車両速度 $V$  (km/h) による衝撃率 $\gamma_{vw}$ として以下の割り増しを見込んでいる<sup>1)</sup>。

$$\gamma_{vw} = 1 + 0.5 \times 0.3V/100 \tag{1}$$

例えば、車両速度が 130 km/h の場合、約 1.2 となる。

一方、曲線中のレールの疲労破壊の照査方法は確立しておらず、設計作用の設定方法も定まっていなかった。ここで、輪重と同様に標準偏差程度の発生確率の横圧の変動を考慮するとした場合、締結装置の設計作用が参考となる。締結装置の設計作用である輪重および横圧は、静的輪重と変動輪重係数および変動横圧係数との積で算定され、変動輪重係数および変動横圧係数はさらに発生確率に応じて A 荷重と B 荷重の二種類に分類される。このうち、B 荷重の横圧は標準偏差程度の発生確率を考慮し設定され、表 1 のように曲線半径に対して、3 区分に分類される。なお、稀に発生する極大な作用は A 荷重として設定され、その場合の変動横圧係数は、各曲線区分において、B 荷重の 2 倍の値となっている。

レールの設計作用うち横圧についても締結装置と同様に、曲線区分に応じて変動横圧係数を設定すると、近接して使用される軌道部材について同じルール・考え方で設計作用を算定できるため合理的である。輪重・横圧が作用した場合のレールの応答は、レールと直接接触している締結装置の挙動と合わせて検討することも多く、レールの作用に関しても締結装置と同様の方法で設定するのが妥当であると考えられる。しかし、締結装置の変動横圧係数の設定に関する文献は少なく、レールに対して同じ値を適用するためには力学的な検証が必要であると考えられた。

そこで、曲線半径等のパラメータを変化させ、設計標準で用いられている、車両や軌道条件から定まるパラメータを入力条件として輪重および横圧を推定する輪重横圧推定式<sup>4)</sup>で横圧を推定し、レールの設計に用いる適切な変動横圧係数を検討することとした。なお、変動輪重係数については一定レベルの軌道状態に整備された軌道条件を想定し、レール応力に影響する軌道の変状である一定値以上の浮きまくらぎ(レールとまくらぎ間に隙間が発生する現象)<sup>5)</sup>や溶接部等で発生するレール頭頂面凹凸<sup>6)</sup>を考慮せず、それ以外の要因で生じる輪重変動を想定し安全側となるよう決定するものとした。

表 1 レール締結装置の変動横圧係数

曲線区分	$R \geq 800\text{m}$	$800\text{m} > R \geq 600\text{m}$	$600\text{m} > R$
変動横圧係数	0.2	0.3	0.4

### 2.2 輪重横圧推定式による変動横圧係数の設定

ある鉄道事業者に敷設されている全線の曲線(曲線半径, カント, 車両速度, 曲線長)を曲線半径(以下,  $R$  とする)に応じて  $R \geq 800\text{m}$ ,  $800\text{m} > R \geq 600\text{m}$ ,  $600\text{m} > R$  の 3 区分で分類し, 各区分に分類された曲線長の合計を母数とし, 各区分において発生する変動横圧係数の発生確率を求めた。具体的な推定方法は以下の通りである。

- ① 曲線毎に曲線半径，カント，車両速度，曲線長を得る。
- ② それらの条件を輪重横圧推定式に代入し，以下の式で表される曲線毎の輪重横圧比 FLF を求める。その曲線では，求めた変動横圧係数が一定に発生するものとする。車両条件は特急用車両（軸重 120kN）とした。

$$FLF = Q_o / (W_o / 2) \tag{2}$$

ここで， $W_o$ ：軸重（kN）， $Q_o$ ：外軌側横圧（kN）である。

- ③ 上記の曲線 3 区分ごとに各曲線を分類し，区分ごとの総延長を母数として，各区分に対して，②で求めた変動横圧係数と曲線の延長で確率頻度分布を求める。

曲線毎の線路延長および上記の分析によって推定した各区分の輪重横圧比の平均および標準偏差を表 2 に，輪重横圧比のヒストグラムを図 3 にそれぞれ示す。（平均値+標準偏差）の輪重横圧比を求めた場合， $R \geq 800$  m では 0.257， $800\text{m} > R \geq 600\text{m}$  では 0.301， $600\text{m} > R$  では 0.347 となり，それぞれの区分で締結装置の B 荷重算定のため設定している変動横圧係数である 0.2，0.3，0.4 と概ね等しい値となっている。なお， $R \geq 800\text{m}$  の区分には本来直線も含むが，曲線の分析のみを行っているので，直線も含めて評価すると， $R \geq 800\text{m}$  の区分における変動横圧係数 0.2 よりも低くなることを確認した。これらを踏まえると，締結装置の B 荷重と同様の変動横圧係数を適用するのが妥当であると判断される。

表 2 輪重横圧比の平均および標準偏差

線別	$R \geq 800\text{m}$	$800\text{m} > R \geq 600\text{m}$	$600\text{m} > R$
軌道延長 (km)	69	46	300
曲線数	452	208	1359
平均値	0.19	0.29	0.34
標準偏差	0.067	0.011	0.007
平均値+標準偏差	0.257	0.301	0.347

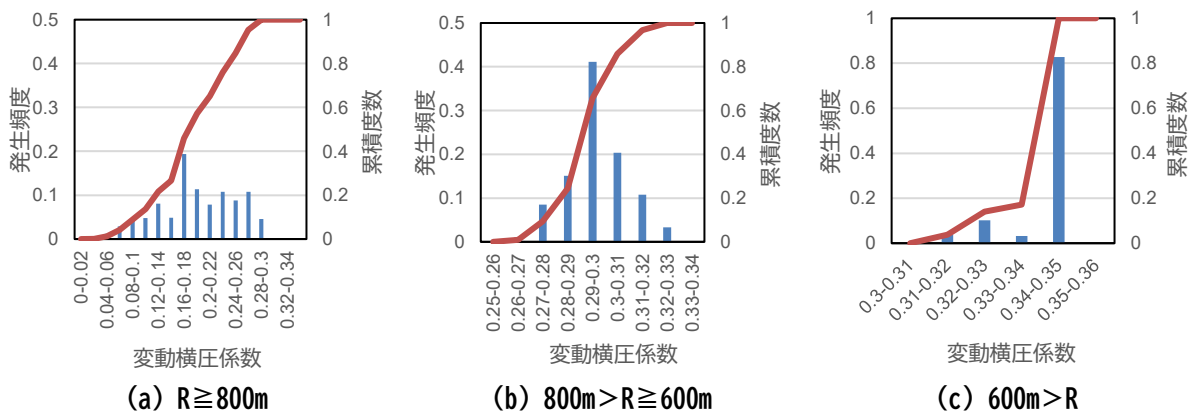


図 3 曲線半径別の輪重横圧比のヒストグラム

### 3. 横圧作用時に発生するレール応力

#### 3.1 解析方法

横圧が作用した場合のレール応力や変位は連続支持の仮定で求めることができるが<sup>7)</sup>，FEMの方が精度

良く推定できる。これまでに提案された FEM の解析手法では、板ばねや軌道パッド等で構成される締結装置の鉛直ばねや水平ばねの非線形性等を考慮した片側レール 1 本の半軌きょうモデル（まくらぎの鉛直・水平支持は剛結）を構築しており<sup>8)</sup>、室内試験との結果の比較から、その妥当性が示されている。ただし、営業線におけるレール応力の再現を想定した場合、外軌と内軌で異なる横圧が作用すること、また、まくらぎの支持ばねも剛結ではないことから、それらを考慮したモデルを検討する必要があると考えられる。

そこで、本研究では、FEM による両レールの軌きょうモデルによって、レール応力を推定することとした。解析には NASTRAN の非線形静的解析を用いることとした。解析モデルを図 4 に示す。両レール、まくらぎ 15 本で構成し、締結装置はレール下面とまくらぎ上面間に①鉛直・②水平のばね要素（①を締結装置・鉛直ばね、②を締結装置・水平ばねという）、および、図 4(b)に示すように、レール底部上面と拘束点間に③鉛直のばね要素（③を締結装置・先端ばねという）を設定した。レールはソリッド要素として、レールの鉛直・水平曲げを考慮することを可能とした。まくらぎもソリッド要素として、鉛直・水平方向がばね要素で支持されている。レール長手方向に対称なモデルを想定し、モデルの片側の端部において、レール端面の長手方向の移動を拘束し、同様に長手方向の端部の位置のレール頭部に輪重・横圧を作用させた。曲線半径 600m 以下の急曲線を最高速度（許容カント量の制限内）で走行した場合の外軌・内軌の輪重・横圧を輪重横圧推定式で計算すると、内軌では外軌の 2/3 程度の横圧となるため、内軌には、外軌の 2/3 の横圧を付与することを基本の条件とした。表 3 に、設定した各パラメータを示す。締結装置の各パラメータについては、対象とする形式の締結装置のばね特性に合わせて線形または非線形で付与する。応力の観測点としては、輪重・横圧を作用させた断面におけるレール底側部の外側・内側とした（以下、それぞれレール応力-外側、レール応力-内側という）。また、まくらぎの鉛直・水平ばねおよび締結装置・先端ばねのばね要素の部材と反対側の節点は完全拘束とした。

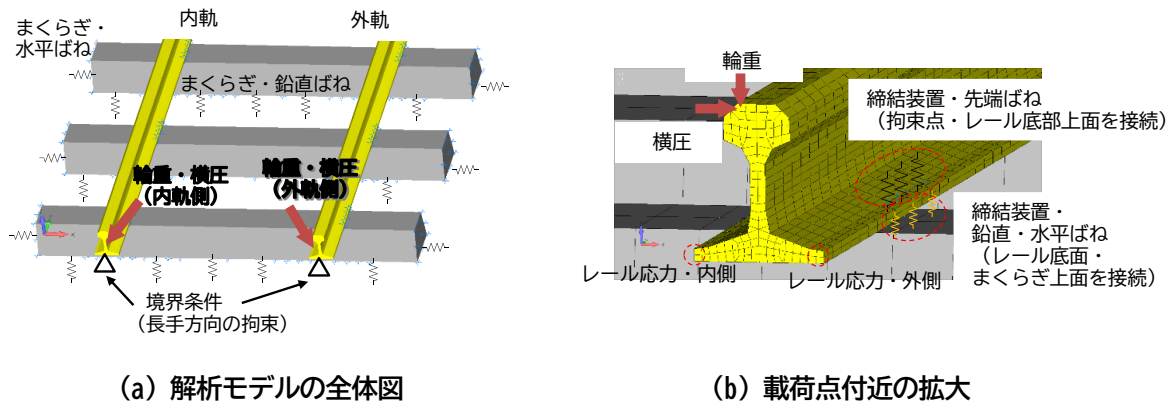


図 4 FEM 解析モデル

表 3 解析条件

項目	詳細
レール種別	JIS 50kgN レール
まくらぎ種別	6号 PC まくらぎ
まくらぎ間隔	670, 806, 1041mm
レール締結装置の鉛直方向ばね	レール締結装置の種別により 線形および非線形特性
レール締結装置の横方向ばね	
レール締結装置の先端ばね	
まくらぎの鉛直方向ばね	50MN/m
まくらぎの水平方向ばね	5MN/m

### 3.2 営業線における車両通過時のレール応力との比較

ある営業線の曲線で車両が通過した際のレール応力を測定して、FEM 解析結果と比較し検証することとした。軌道変位や浮きまくらぎ、頭頂面凹凸が十分に小さい箇所を選定し、車両通過時のレール応力を測定した。図 5 にひずみゲージの設置位置、表 4 に試験の軌道条件、表 5 に車両条件を示す。本試験では半径 300m の曲線外軌で、2 種類の車両走行時（速度 57~72km/h）の輪重・横圧およびレール応力を測定した。輪重・横圧は 4 つの 2 軸のひずみゲージでブリッジを組んだせん断ひずみ法により測定を行った。レール応力を測定するためのひずみゲージは外軌のまくらぎ間の中心位置の軌間外・内側のレール底部に設置した。さらに、横圧の影響を打ち消し輪重による鉛直曲げのみの影響を評価するために、軌間外・内側で発生する応力を平均して整理したものを「レール応力-平均」として整理した。一方で、横圧のみの影響を評価するために、レール応力-外側からレール応力-平均を引いたものを「レール応力-差分」として整理した。

車両 A および車両 B のそれぞれ計 10 列車の各輪軸（計 100 軸）が通過した際のピーク値を集計し、輪重や横圧等の各項目で平均化して評価した。なお、ピーク値の集計については、軌間外側向きを正とした場合に正方向に凸形状となる最大値を用いた。図 6 に各項目のピーク値の平均を示す。輪重、横圧、レール応力-平均、レール応力-差分の各項目で、車両別、前・後軸に分類した結果を示している。

図 7 に各輪軸通過時の輪重とレール応力-平均のピーク値の関係を、回帰直線と併せて示す。ここでは、同一軌道条件において FEM 解析で求めた輪重とレール応力-平均の関係も示している。輪重とレール応力-平均はほぼ線形関係を示しており、急曲線の横圧作用下においても、横圧の影響を無視し、レール応力-平均を輪重によって発生する鉛直曲げによるレール応力として表すことができる。また、FEM 解析結果は、測定結果より得られた輪重とレール応力の関係と同様な傾向を示しており、同じ輪重の場合に最大 10%程度の違いであることがわかる。

図 8 に各輪軸通過時の横圧とレール応力-差分の関係について、測定結果と FEM 解析結果を合わせて示す。横圧とレール応力-差分の関係もほぼ線形関係を示している。レール応力-差分とすることによって、輪重による鉛直曲げの影響がほぼなくなり、横圧のみが強く影響したものとなっている。また、FEM 解析結果は、測定結果と良好に一致していることから、この手法によって横圧作用時のレール応力の応答を推定

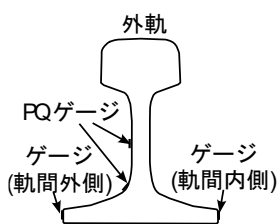


図 5 ひずみゲージ設置位置

表 4 軌道条件

項目	詳細
レール種別	JIS 50kgN
まくらぎ種別	6号 PC
まくらぎ間隔	670mm
軌道パッドばね	110MN/m
曲線半径	300m
カント	80mm

表 5 車両条件

項目	条件	
走行速度	57~72km/h	
測定輪重	42~79kN	
車両種別	A	B
静的輪重	39.3kN	52.8kN

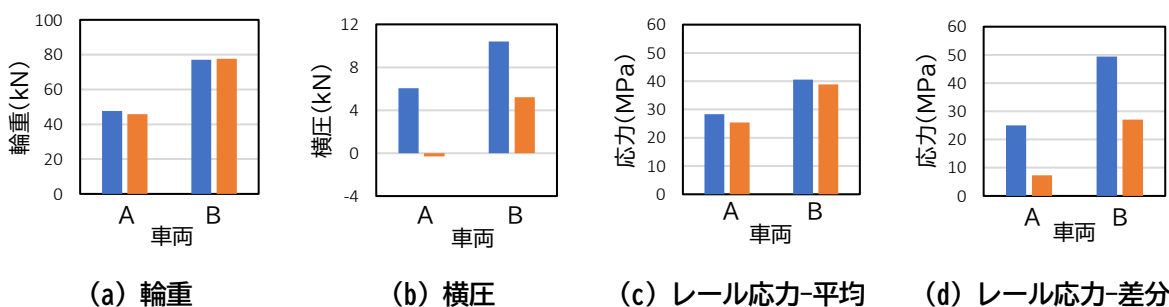


図 6 測定結果のピーク値の平均（青：前軸，橙：後軸）

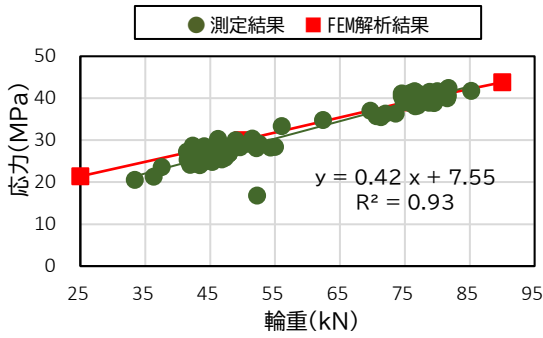


図7 輪重とレール応力-平均のピーク値の関係

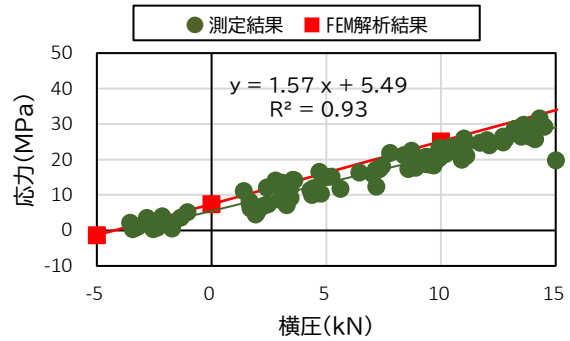


図8 横圧とレール応力-差分の関係

できると考えられる。一方で、回帰直線の切片が0にならないのは車輪とレールの接触位置がレール中心から偏心しているため、モーメントが生じていることによるものと考えられる。

### 3.3 FEM解析によるパラメータスタディ

現地試験結果との比較により FEM 解析結果の妥当性が得られたことから、本解析手法を用いて外軌のレール応力に対する内軌側の横圧やまくらぎ水平ばね、まくらぎ間隔の影響に関するパラメータスタディを実施した。

#### 3.1.1 外軌のレール応力に対する内軌側の横圧の影響

内軌に作用する横圧を変化させた場合の外軌のレール応力を評価するため、外軌の横圧は一定とし、内軌の横圧のみを変化させた。図9に内軌の横圧とレール応力-差分、平均の関係を示す。内軌横圧が変化した場合の外軌レール応力への影響に着目する目的で、内・外軌の輪重は75kN、外軌の横圧は20kNの一定とした。内軌の横圧を小さくすると、レール応力-差分は大きくなるのがわかる。これは、軌間中心を対称に軌間外側へ作用する内・外軌の横圧がまくらぎを介して打ち消しあうため、内軌の横圧が小さくなると、外軌の横圧の影響がレール応力-差分に対して支配的になるためと考えられる。一方で、レール応力-平均に影響を及ぼさないことがわかる。

#### 3.3.2 まくらぎの水平ばねの影響

図10にまくらぎの水平ばねとレール応力-差分の関係を示す。内・外軌の輪重は75kN、内・外軌の横圧はそれぞれ5kNと10kNである。設計標準<sup>1)</sup>によるとバラスト軌道上でまくらぎ1本を水平に引いた場合の道床横ばね係数は数MN/m～10MN/mと知られており、この範囲におけるレール応力への変化は小さい。ただし、剛の状態を仮定し、1000MN/mとした値と比較すると、10～20%程度レール応力が大きくなる。まくらぎの水平ばねを剛とした軌間中心の対称モデルとした場合は、レール応力の横圧に対する影響を数10%過少に見積もる可能性があることから、バラスト軌道のモデル化にあたっては実際のばね値を使用することが望ましい。

#### 3.3.3 まくらぎ間隔の影響

まくらぎ間隔を670, 806, 1041 mm、輪重を60, 75, 90 kNの3通り、横圧を10, 15, 20 kNの3通りに変化させて、レール応力-平均と差分に及ぼす影響を評価した。図11に輪重、横圧、まくらぎ間隔とレール応力の関係を示す。まくらぎ間隔を670 mmから1041 mmとした場合、いずれの輪重に対して1.23～1.25倍程度、横圧に対して1.30～1.36倍程度、応力が増加することがわかる。曲線の場合、輪重に加えて横圧の影響を考慮するため、まくらぎ間隔を大きくすると、応力の増加量が大きくなることに留意するべきである。

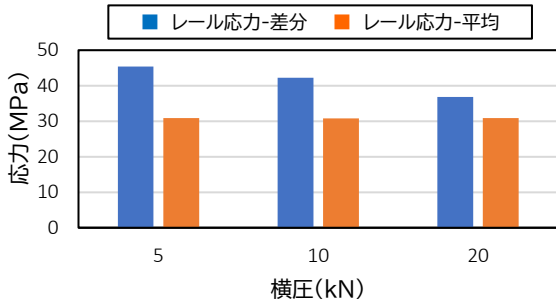


図9 内軌横圧とレール応力-差分, 平均

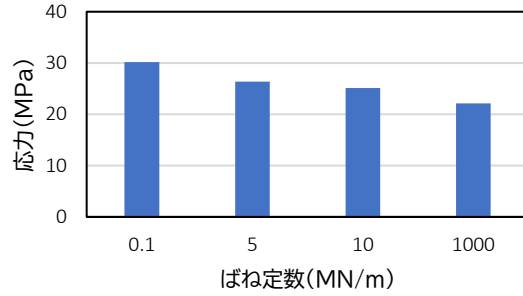
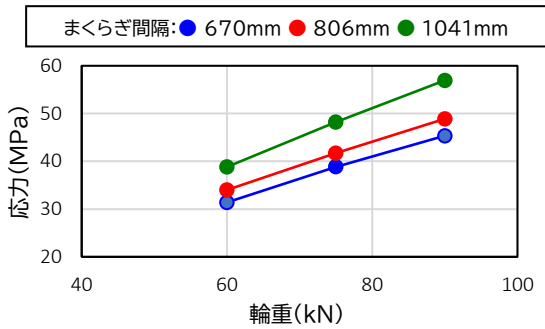
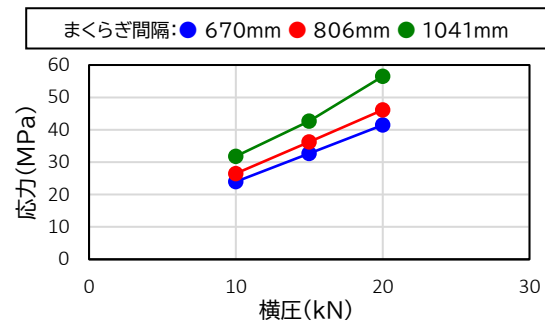


図10 まくらぎ水平ばねとレール応力-差分



(a) 輪重とレール応力-平均



(b) 横圧とレール応力-差分

図11 輪重, 横圧, まくらぎ間隔とレール応力の関係

#### 4. 曲線におけるレールの疲労破壊の照査方法の提案と試算

ここまで述べてきた方法により, 曲線におけるレールの疲労破壊に関する作用と応答の推定が可能となった. この推定手法を実際の設計に適用するためのフローの検討とそれによる試算結果を示す.

まず, 直線におけるレールの設計のための疲労破壊の照査フローは図12の通りである<sup>1)</sup>. 特に, 赤線で囲んだ「輪重による変動応力の計算」を曲線に対応させるため, ここまで検討した内容を反映させる. なお, レール締結装置と同様にレールについても, 静的輪重に変動横圧係数を乗じたものを, 照査に使用する横圧を設計横圧と称する. また, 式(1)等の設計で考慮する輪重の変動分の係数を変動輪重係数と定義し, 静的輪重に乘じ, 照査に使用する輪重を設計輪重と称する. まず作用の設定として,

- ① 対象とする各曲線区分に応じて, 変動輪重・横圧係数を設定し, 静的輪重に対して乗じた値を設計輪重・横圧とする.
- ② 輪重横圧推定式や車両走行シミュレーション等で各種曲線の条件に応じて任意に作用を設定する. という2つの方法が考えられる. ②については, 曲線の設計をする場合には, 2章で記載した輪重横圧推定式等で, 曲線や車両の条件等を使って任意に設定すればよい. ここでは, ①の方法を検討する.

##### 4.1 設計輪重および設計横圧の検討

曲線中で生じる輪重(外軌輪重 $P_o$ )は, 曲線の条件に応じて以下の式のように変化する.

$$P_o = \frac{W_o}{2} \left\{ \left( 1 + \frac{v^2}{gR} \cdot \frac{C}{G} \right) + \frac{H_G^*}{G/2} \cdot \left( \frac{v^2}{gR} - \frac{C}{G} \right) \right\} \quad (3)$$

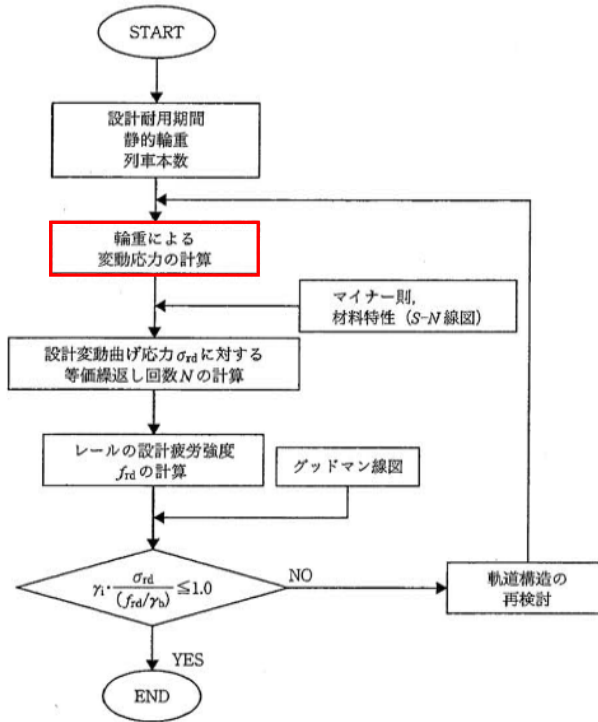


図 12 レールの疲労破壊の照査フロー

ここで、 $W_0$ ：軸重 (kN)， $v$ ：走行速度 (km/h)， $g$ ：重力加速度 ( $m/s^2$ )， $R$ ：曲線半径 (m)， $C$ ：カント (mm)， $G$ ：軌間 (mm)， $H_G^*$ ：レール面から車両重心までの高さ (mm) である。

2章の表2を求めたように、ある鉄道事業者に敷設されている全線の曲線を  $R \geq 800m$ ， $800m > R \geq 600m$ ， $600m > R$  の3種類の曲線区分で分類し、各区分に分類された曲線長の合計を母数とし、各曲線条件を式(3)に入力することによって、変動横圧係数と同様に、各曲線区分の輪重横圧比（外軌輪重 $P_o$ /静的輪重 $W_0/2$ ）の平均および標準偏差を求めた。なお、算定条件は表2と同様に特急車両の条件としている。

表6に算定結果を示す。横圧同様、曲線半径が小さいほど大きな係数となっているが、曲線区分で大きな差はなく、3区分で平均+標準偏差の値は1.212~1.267となっている。直線の場合、速度衝撃率を考慮して式(1)を用いていたが、今回計算した特急の最高車両速度130km/hを入力した場合、1.20となり  $R \geq 800m$  の区分の平均+標準偏差と近い値となっている。そこで、安全側の値を参照して以下では曲線半径によらず1.3を変動輪重係数として設定することとした。

次に設計横圧は、図3の結果から、 $R \geq 800m$  の区分では締結装置のB荷重の値よりも大きな値が発生しているものの、実際は直線を含むとより値は小さくなるため、それぞれの区分で値を小数点以下2桁で切り上げて表7のように設定するものとした。

表6 変動輪重係数の平均・標準偏差

曲線区分	$R \geq 800m$	$800m > R \geq 600m$	$600m > R$
軌道延長 (km)	69	46	300
曲線数	452	208	1359
平均	1.15	1.25	1.26
標準偏差	0.062	0.007	0.007
平均+標準偏差	1.212	1.257	1.267

表7 寿命推定のための変動輪重・横圧係数

曲線区分	$R \geq 800m$	$800m > R \geq 600m$	$600m > R$
変動輪重係数	1.3		
変動横圧係数	0.2	0.3	0.4

表 8 設計条件

車両・軌道条件	項目	数値
車両条件	静的輪重	51.6kN
	最大走行速度	130km/h
	年間通過トン数	200, 400 万トン
	設計耐用年数	50 年
	累積通過トン数	1, 2 億トン
軌道条件	レール種別	JIS 50kgN レール
	レール締結装置の鉛直ばね	100MN/m
	レール締結装置の横方向ばね	70MN/m
	レール締結装置の先端ばね	1MN/m
	まくらぎ間隔	694, 806, 1041mm
	まくらぎの鉛直ばね	30MN/m
	まくらぎの水平方向ばね	5MN/m

表 9 レール締結装置の変動横圧係数

曲線区分	R ≥ 800m	800m > R ≥ 600m	600m > R
変動横圧係数	0.2	0.3	0.4

表 10 設計変動曲げ応力 (単位: MPa)

まくらぎ間隔 (mm)	曲線半径		
	R ≥ 800m	800m > R ≥ 600m	600m > R
694	58.9	67.8	76.3
806	64.2	74.1	83.8
1041	75.3	88.0	100.3

## 4.2 疲労寿命の試算

検討の手順は図 12 のフローに従い、以下のとおりとした。

- ① 軌道の構造条件や車両速度、設計輪重・横圧等に対する設計変動曲げ応力 $\sigma_{rd}$ を推定し、これを設計応答値とする。
- ② レールの疲労設計曲線 (S-N 線図) を用いて、設計耐用年数に対応する設計疲労強度 $f_{rd}$ を推定し、これを設計限界値とする。

また、設計条件として、締結装置の各種ばね係数やまくらぎ間隔等を設定する。設定項目の一覧を表 8 に示す。

### 4.2.1 設計輪重・横圧

設計輪重・横圧は、静的輪重に変動輪重・横圧係数を乗じて算出する。各曲線区分の設計輪重・設計横圧は表 9 に示す通りである。

### 4.2.2 設計変動曲げ応力 $\sigma_{rd}$

レール応力は、前述の通り、FEM モデルを用いて求める。各曲線区分およびまくらぎ間隔から求められる設計変動曲げ応力 $\sigma_{rd}$ は表 10 に示す通りである。

### 4.2.3 設計疲労強度 $f_{rd}$

設計疲労強度 $f_{rd}$ はレール鋼の S-N 曲線で求められる式(4)を用いて算出する。

$$f_{rd} = \frac{(\alpha_r \cdot \log_{10} N + k) \left(1 - \frac{\sigma_{\min}}{f_{ruk}}\right)}{\gamma_s} \quad (4)$$

ここに、 $N$ ：繰返し数（回）（耐用期間中の総通過軸数）， $\alpha_r$ ：疲労設計曲線の傾き（ $N \leq 2.13 \times 10^6$  の場合：-125， $N > 2.13 \times 10^6$  の場合：-63）， $k$ ：疲労設計曲線の切片（ $N \leq 2.13 \times 10^6$  の場合：977， $N > 2.13 \times 10^6$  の場合：585）， $f_{ruk}$ ：レールの真破断強度（MPa，1500 MPa とする）， $\sigma_{min}$ ：最小応力（MPa，温度応力を見込む。定尺レールで 30 MPa）， $\gamma_s$ ：材料係数（1.05）である。

4.2.4 レールの耐用累積通過トン数および設計疲労強度  $f_{rd}$

年間通過トン数 200 万トンまたは 400 万トン，耐用年数 50 年とすると，レールの耐用累積通過トン数はそれぞれ 1 億トンおよび 2 億トンとなる。このとき，静止輪重  $P_{st}$  を 51.5kN とすると，総通過軸数  $N$  はいずれの耐用累積通過トン数の場合でも  $2.13 \times 10^6$  回を超えることから， $\alpha_r$  および  $k$  の値が定まり，式(4)に各種パラメータを代入し整理すると，式(5)を得る。

$$f_{rd} = -58.8 \log_{10} N \left( \frac{5 \times 10^8}{P_{st}} \right) + 546 \tag{5}$$

4.2.5 性能照査

以下の式により検討した軌道構造の可否を判定する。

$$\gamma_i \cdot \frac{I_{Rd}}{I_{Ld}} \leq 1.0 \tag{6}$$

ここに， $I_{Rd}$ ：設計応答値， $I_{Ld}$ ：設計限界値， $\gamma_i$ ：軌道構造係数である。軌道構造係数は，設計標準において，軌道構造の重要度，限界状態に達した時の社会的影響，経済性を考慮して設定される安全係数であり，直線におけるレールの疲労破壊の照査で用いられている 1.1 とする<sup>1)</sup>。

4.2.6 照査結果と考察

表 11 にレールの耐用累積通過トン数 1 億トンおよび 2 億トンの場合のレールの疲労破壊の照査結果を示す。曲線半径が小さく，かつ，まくらぎ間隔が大きくなるほど，発生する応力が大きくなり，式(6)に示した照査式で算定した結果も大きくなり判定値 1.0 に対する余裕が小さくなる。その結果，累積通過トン数 1 億トンの場合，いずれのまくらぎ間隔，曲線半径の条件でも要求性能を満足した一方で，累積通過トン数 2 億トンの場合，最も厳しい急曲線の  $600m > R$  以下の条件では性能を満足しなかった。

なお，発生するレール応力が疲労限度以下であれば，疲労破壊が発生しない結果<sup>9)</sup>も得られており，今回検討した 1 億もしくは 2 億トンの累積通過トン数の実際の営業線での使用されるレールでの妥当性については，実際の使用状況，すなわち，軌道の管理状況を考慮して検討する必要がある。具体的には，営業線の急曲線区間において累積通過トン数 2 億トン以上に達してさらに使用されている事例があるが，このよう

表 11 レールの疲労破壊の照査結果

(a) 累積通過トン数 1 億トン				(b) 累積通過トン数 2 億トン			
まくらぎ間隔 (mm)	曲線半径			まくらぎ間隔 (mm)	曲線半径		
	$R \geq 800m$	$800m > R \geq 600m$	$600m > R$		$R \geq 800m$	$800m > R \geq 600m$	$600m > R$
694	0.57	0.66	0.74	694	0.66	0.75	0.84
806	0.62	0.72	0.81	806	0.71	0.82	0.93
1041	0.73	0.85	0.96	1041	0.83	0.98	1.11

な箇所について疲労限度の観点から十分余裕をみて管理すれば、疲労破壊の発生を抑えることができる。また、今回検討したまくらぎ間隔を拡大した条件で、レールが経験した累積通過トン数が1億トンに迫り、さらに継続して使用可能か検討する場合、レール探傷の結果やレール応力に影響を及ぼす、レール頭頂面凹凸や浮きまくらぎ等の発生状況を鑑みて判断すればよいものと考えられる。

## 5. まとめ

本研究では、軌道構造の設計方法を構築する一環として、曲線におけるレールの疲労破壊の照査方法を検討した。その結果は以下の通りである。

- (1) 曲線におけるレールの疲労破壊に関する安全性の照査に用いる設計作用を決めるために、車両走行時の横圧を曲線半径等の各種パラメータを変化させて輪重横圧推定式で推定し、横圧の発生確率を考慮して曲線半径に応じた横圧の変動横圧係数の設定方法を検討した。
- (2) ある鉄道事業者に敷設されている全線の曲線を  $R \geq 800\text{m}$ ,  $800\text{m} > R \geq 600\text{m}$ ,  $600\text{m} > R$  の曲線3区分で分類し、各区分に分類された曲線長の合計を母数とし、各区分において発生する確率頻度分布の発生確率を求めた。その結果に平均値+標準偏差の輪重横圧比を求めた場合、 $R \geq 800\text{m}$  で 0.25,  $800\text{m} > R \geq 600\text{m}$  で 0.30,  $600\text{m} > R$  で 0.35 となった。
- (3) 応答値である横圧作用時のレール底部の曲げ応力の推定方法を検討した。鉛直・水平方向の曲げおよび反りねじりの曲げ、締結装置の非線形性、外軌・内軌の横圧等を考慮した FEM による両レールの軌きょうモデルを構築した。本モデルによる解析結果は、営業線における車両通過時のレール底部の曲げ応力と 10%以内の精度で推定できることを確認した。また、本モデルを用いてパラメータスタディを実施し、内軌側の横圧やまくらぎ水平ばね、まくらぎ間隔の影響を明らかにした。
- (4) 提案した曲線におけるレールの疲労破壊に関する作用と応答の推定方法を用いて、疲労寿命の試計算を実施した。軌道条件や車両条件に対する設計応答値と、S-N 線図に基づき求まる設計限界値を用いて照査式により性能照査を実施した結果、曲線半径が小さく、かつ、まくらぎ間隔が大きくなるほど、発生する応力が大きくなり照査式の判定値に対する余裕が減少する傾向を確認した。

## 文 献

- 1) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説 軌道構造，pp.9-40，2011
- 2) 上浦正樹，三枝長生，茂木重六，白井幸彦：鉄まくらぎ分岐器のまくらぎ間隔拡大に関する研究，土木学会論文集，Vol.2001，No.667，pp.157-164，2001
- 3) 弟子丸将，山岡大樹，伊藤孝記，清水紗希：まくらぎ間隔拡大に対応したバラスト軌道の設計法，鉄道総研報告，Vol.36，No.3，pp.23-28，2022
- 4) 高井秀之：鉄道車両の乗り上がり脱線に対する安全性の実用的評価手法とその応用，東京大学博士論文，pp.33-41，2013
- 5) 楠田将之，田中博文，片岡宏夫：浮きまくらぎ検出に対する各種軌道諸元の影響確認と実務適用に向けた計算手法の構築，構造工学論文集，Vol.65A，pp.52-62，2019
- 6) 弟子丸将，片岡宏夫，阿部則次，大野宗伸，経年ロングレールの疲労寿命推定，鉄道総研報告，Vol.20，No.4，pp.5-10，2006
- 7) 佐藤裕：横圧に対する軌道強度の研究，鉄道技術研究報告，Vol.41，No.110，1960
- 8) 玉川新悟，片岡宏夫，弟子丸将：レールの小返り解析モデルの提案とレール締結装置の性能評価試験への応用，土木学会論文集 A1 (構造・地震工学)，Vol.73，No.2，pp.330-343，2017
- 9) 細田充，水谷淳，岩崎幹大，山本隆一：鉄道の経年レールの底部の表面粗さによる疲労限度の予測手法と疲労試験方法の違いによる影響，日本機械学会論文集，Vol.86，No.888，2020

## 気象条件の変化による岩石中の割れ目の進展性評価手法

久河 竜也\* 浦越 拓野\* 河村 祥一\*

## Evaluation Method of Crack Propagation in Rocks Caused by Change in Weather Conditions

Tatsuya HISAKAWA Takuya URAKOSHI Shoichi KAWAMURA

We have developed a model that evaluates the crack propagation susceptibility in rock by weather change. This model consists of two formulae: one characterizing rock deformation due to changes in temperature and humidity, and the other defining the crack growth rate due to stress changes caused by rock deformation. These formulae were derived from forced deterioration experiments on rock specimens subjected to variations in temperature and humidity. Furthermore, we validated the formulae by using the data on past rockfall occurrences.

キーワード：割れ目，パリス則，落石，乾湿繰り返し試験

## 1. はじめに

剥落型落石は、割れ目の進展により岩石が岩盤から剥離し落下する現象で、大雨や地震などの明確な誘因によらずとも発生しうる特徴を持つ<sup>1)</sup>。この特徴から、運転規制のみでなく、点検、対策工等により落石災害を防止する必要があり、対策の効率的な実施のため、剥落型落石の危険度評価が望まれる。

剥落型落石の発生の起点となる岩石中の割れ目の進展メカニズムに関しては、柱状節理が発達した寒冷地に関する研究<sup>2)</sup>等がなされており、個別の地質条件や気象条件下での理解が進んでいるが、一般的に適用可能性の高い研究は少ない。このように、岩石中の割れ目の進展メカニズムに関する一般的な知見が乏しいため、現状では剥落型落石の危険度評価の際に、割れ目の進展しやすさを考慮するのは困難である。

そこで、剥落型落石の危険度の詳細・長期的な評価につなげるため、本研究は、割れ目の進展性評価手法の提案を目標とした。特に、明確な誘因なく発生する剥落型落石へ適用するため、降水や温湿度変化等の日常的な気象変化による割れ目の進展を対象とした。以下、本稿で気象変化という場合、このような日常的变化を指す。

本研究では、まず岩石中の割れ目の進展に関する既往の理論に基づき、気象変化による割れ目の進展現象の概念モデルを提案した。この概念モデルは①気象条件の変化による応力変動の発生と、②応力変動に伴う割れ目の進展の2つの要素から構成される。次に、構成要素のそれぞれに関する試験と定式化を行った。①について、気象変化による岩石中の応力変動の把握を目的に、試験室と実斜面で岩石の変形を測定し、その結果を踏まえ気象変化に伴う変形予測式を作成した。②について、乾湿変化に伴う繰り返し応力による岩石中の割れ目の進展特性を明らかにするため、割れ目を模した切欠きを設けた供試体に対し、載荷条件下で乾湿繰り返し試験を行い、その結果を踏まえて割れ目の進展速度予測式を検討した。最後に、構築した2つの予測式を組み合わせ、気象変化による割れ目の進展速度予測手法を構築するとともに、試算を行い構築した予測手法の活用方針の例を示した。なお、本稿は、文献3から内容を抜粋したうえで、加筆・修正したものである。詳細は文献3を参照されたい。

\* 防災技術研究部 地質研究室

## 2. 岩石中の割れ目の進展を記述する理論

日常的な気象変化などに由来した、破壊靱性値以下の応力レベルでも岩石中の割れ目の進展が発生することがある。応力が繰り返し作用する条件下での研究が行われており、繰り返し作用に対する割れ目の進展が、金属等の延性材料の分野でよく用いられる、以下のパリス則<sup>4)</sup>に従うことが多い。

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (1)$$

ここで、 $a$ は割れ目の長さ、 $N$ はサイクル数、 $\Delta K$ はサイクル中の応力拡大係数変動の振幅、 $C$ と $m$ は材料と周囲の環境により定まる数で、 $m$ の値はカララ大理石で4程度<sup>5)</sup>、ベレア砂岩で20程度<sup>6)</sup>と報告されている。

温度変化や乾湿変化等の周囲の環境変化によって発生する応力に由来した準脆性材料中の割れ目の進展に関する研究として、乾湿変化により生じる一度の応力変化と岩石の強度の関係から割れ目の発生に関して論じたもの<sup>7)</sup>や、温度変化により生じる繰り返し応力を仮定して理論的なモデルの構築を試みたもの<sup>8)</sup>がある。しかし、乾湿変化が繰り返される条件での割れ目の進展に関する考察はほぼ行われていない。

## 3. 岩石の割れ目進展の概念モデル

気象変化による岩石中の割れ目の進展の概念モデルとして、気温や湿度等の気象条件の変化による変形に伴う応力変動が生じ、その繰り返しによって割れ目が進展するというモデルが考えられる。このようなモデルに基づけば、割れ目の進展速度予測式として、気象条件を入力、応力変動を出力とする式(検討事項 $\alpha$ )と、応力変動を入力として割れ目の進展速度を出力する式(検討事項 $\beta$ )をそれぞれ構築し、組み合わせたものが考えられる。

検討事項 $\alpha$ について、気温や湿度等の気象変化により岩石に生じる変形や、内部に生じる応力が不明であるという課題があり、発生する応力を適切にモデル化する必要がある。たとえば、多くの材料では温度が上昇すると材料内部に熱応力(膨張)が生じることが知られている。また、土材料では吸水に伴い、最適含水比までは収縮し、その後膨張することが知られている。しかし、温度変化、乾湿変化の両方が加わる自然環境下の岩盤斜面で気象変化に対して生じる変形や応力変動についての研究事例は少ない<sup>9)</sup>。また、岩石の変形では、温度上昇による膨張と温度上昇に伴う乾燥による収縮といった競合的な作用も考えられるため、実験的に検討し、変形に寄与が大きい気象変化の要素を抽出することが重要であり、その結果に基づき応力変動の特性を把握する必要がある。

検討事項 $\beta$ の応力変動と割れ目の進展に関しては、気象変化は繰り返し発生することから、式(1)のパリス則をベースに定式化を行う方針とする。この際、乾湿変化や温度変化による応力での割れ目進展に対するパリス則の適用性を検討する必要がある。

そこで、検討事項 $\alpha$ と $\beta$ のそれぞれに関して、室内試験や現地測定にてデータを収集し、得られたデータに基づき検討する方針とした。まず、検討事項 $\alpha$ について、気象変化と発生する応力変動の関係を調べるため、温度や湿度が変化する環境下において、岩石に発生するひずみを測定した。次に、検討事項 $\beta$ について、気象変化によって生じた応力変化による割れ目の進展特性がパリス則によって説明できるか検討するため、割れ目を模した切欠きを設けた岩石に対して乾湿繰り返し試験を行った。

## 4. 温度・湿度変化時の岩石の変形に関する試験

検討事項αについて、気温や湿度の変化、降水等の気象変化による岩石の膨張、収縮等の変形特性を把握するため、室内と現地のそれぞれで岩石のひずみを測定した。室内試験では、割れ目を含まない岩石供試体を対象に、雰囲気温度と相対湿度の一方のみが変化する条件下で、岩石のひずみを測定した。現地試験では、岩盤斜面中の岩石表面にひずみゲージや変位計を設置して測定し、気象変化との対応を分析した。

### 4.1 室内試験の方法

来待砂岩のブロックから 15mm×30mm×130mm の割れ目を含まない角柱状供試体を 3 個整形し、うち 2 個をひずみ測定用とし、30mm×130mm の 2 面にひずみゲージを貼り付けた（図 1）。また、残りの 1 個は質量測定用とした。岩石中の平均粒径は 0.60mm で、ゲージ長は平均粒径より十分大きい 10mm とした。ひずみゲージは 1 成分、ひずみの測定方向は供試体の長軸方向とした。

これらの供試体を 2 種の試験 A, B に供した。試験 A では、恒温恒湿槽を用いて雰囲気温度を 35℃で一定とし、相対湿度のみ変化させた。試験 B では、相対湿度を 60%で一定とし、雰囲気温度のみ変化させた。相対湿度や雰囲気温度の変化過程として、ステップ状に変化させる過程（ステップ変化過程）と、線形に変化させる過程（線形変化過程）を設定した。また、試験 A, B ともにステップ変化過程と線形変化過程は同一の恒温恒湿槽で連続して行った。ひずみは試験開始時刻における値を 0、伸長を正として、サンプリング周期 1 分で、雰囲気温度、相対湿度はサンプリング周期 5 分で測定した。質量は線形変化過程の途中で槽内から質量測定用の供試体を 3 時間に 1 回程度取り出して測定し、測定後に槽内に戻して試験を継続した。

### 4.2 室内試験結果と考察

#### 4.2.1 湿度変化や温度変化に対する変形の特徴

試験 A のステップ変化過程では、相対湿度の変化に遅れてひずみ変動しており、その変動は相対湿度上昇時に膨張傾向であった（図 2）。湿度のステップ変化に対するひずみの過渡的な応答は 24 時間程度で収束した。また、試験 B のステップ変化過程では、温度上昇直後に急激に膨張し、その後時間をかけて収縮しており、温度低下時にはその逆の傾向の変動を示した（図 3）。試験 B の温度変化直後のひずみの変動

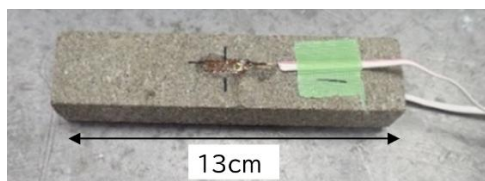


図 1 ひずみゲージを貼った供試体(両面にひずみゲージ貼付)

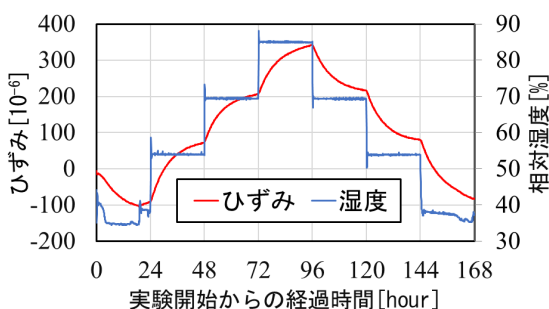


図 2 試験 A・湿度変化試験（ステップ変化過程）のひずみ測定結果例

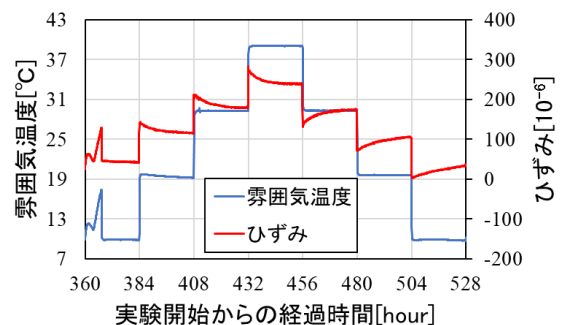


図 3 試験 B・温度変化試験（ステップ変化過程）のひずみ測定結果例

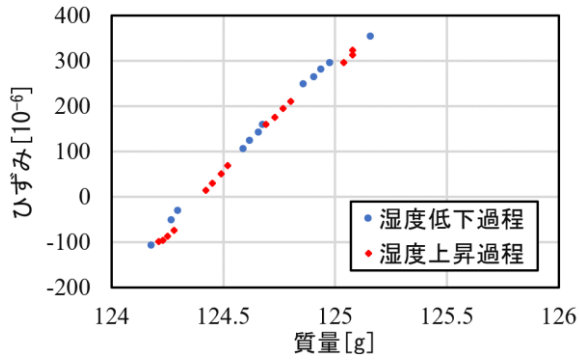


図4 試験A(湿度変化)における質量とひずみ

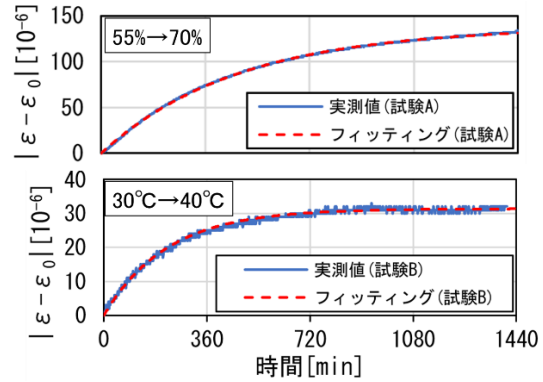


図5 試験A, 試験Bのフィッティング結果例

の大きさは  $100\sim 120 \times 10^{-6}$  であった。温度の変化が  $10^{\circ}\text{C}$  程度、岩石の線膨張係数が  $10 [10^{-6}/\text{K}]$  程度である<sup>10)</sup> ことから、温度変化直後の変形は熱変形と考えられる。なお、試験A, 試験Bともにひずみゲージごとの変形の傾向の差は小さく、他のひずみゲージでも図2, 図3に例示した結果と同様であった。

試験Aの質量測定の結果、各供試体の質量とひずみが概ね線形関係にあることが認められた(図4)。この質量の増減は、含水量の変化によると考えられ、試験Aの結果は、湿度上昇に伴い岩石が吸水膨張したと解釈できる。

#### 4.2.2 多孔質材料の吸湿に基づく変形のモデル化

吸水による岩石の変形を、多孔質材料の吸湿に関する理論を考慮してモデル化する。初期含水比  $w_0$  の多孔質物質に対して、時刻  $t = 0$  において湿度のステップ変化を与え、その後湿度を一定に保った場合の含水比  $w$  の時間変化は、平衡状態の含水比  $w_e$  と反応速度定数  $k$  を用いて、以下のように書ける<sup>11)</sup>。

$$w = (w_0 - w_e) \exp(-kt) + w_e \tag{2}$$

ここで、図4から、含水比とひずみが線形関係にあり、含水比とひずみ  $\varepsilon$  が比例すると仮定すると、初期状態のひずみを  $\varepsilon_0$ 、平衡状態のひずみを  $\varepsilon_e$ 、 $|\varepsilon_0 - \varepsilon_e| = \varepsilon_d$  とすれば、式(2)から以下が成り立つ。

$$|\varepsilon - \varepsilon_0| = \varepsilon_d \{1 - \exp(-kt)\} \tag{3}$$

温度、湿度のステップ変化過程のひずみの時系列データに対して、式(3)に適合するパラメータを最小二乗法で推定した。ただし、雰囲気温度や湿度が設定値で一定であった時間のデータのみを対象とし、設定値の変更直後の温湿度変化による変形や、温度変化により即座に生じる熱変形は考慮していない。推定結果は、湿度変化を与えた試験A、温度変化を与えた試験Bとも、決定係数  $R^2$  値は多くの場合に 0.98 以上で、試験結果をよく再現した(図5)。このことから、試験Aの供試体の変形は多孔質材料への吸湿に伴う変形で説明でき、試験Bの温度変化後の過渡的な変形も、主要な要因は含水量変化だと考えられる。

来待砂岩供試体の湿度変化試験に対するフィッティングにより推定された反応速度定数  $k$  には、明確な湿度依存性は確認されなかった(図6)。一方で、温度変化試験により推定された反応速度定数  $k$  には、頻度因子  $A$ 、気体定数  $R$ 、活性化エネルギー  $E_A$  の化学反応における反応速度定数と絶対温度  $T$  の関係を示すアレニウスの式

$$\ln k = \ln A - \frac{E_A}{RT} \tag{4}$$

に従う温度依存性が確認され、温度が高いと  $k$  が大きいことが確認された(図7)。反応速度定数が湿度(濃

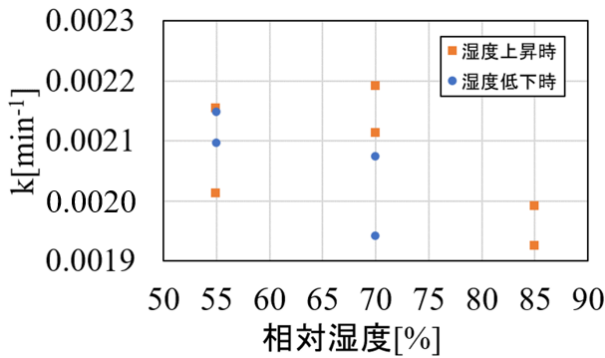


図6 相対湿度と反応速度定数kの関係

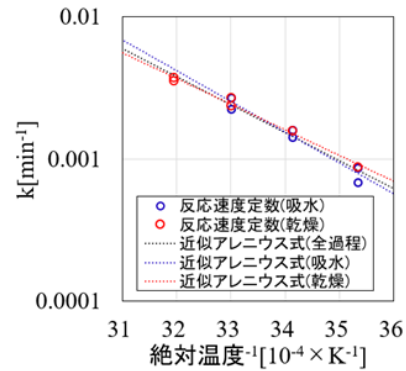


図7 反応速度定数kのアレニウスプロット

度) 依存しないことやアレニウスの式に従う温度依存性を有することは、他の多孔質材料の既往結果<sup>11)</sup>と整合的である。

#### 4.2.3 現地測定

降雨も含めた気象変化に対する岩石の変形特性の把握、および岩石が変形した際の自然の岩盤における割れ目の開閉、進展の有無の把握を目的に、山梨県大月市の安山岩が露出した北向き斜面で、現地測定を行った。亀裂変位計とひずみゲージによる測定を、割れ目をまたいで実施した。割れ目の進展しやすさや、割れ目周辺の境界条件の異なる割れ目に関するデータを取得するため、走向傾斜から、重力により主にせん断力が作用すると思われる割れ目 S および主に引張力が作用すると思われる割れ目 T の 2 つを対象とした。また、ひずみゲージによる測定を、割れ目をまたがない母岩部分でも実施した(図 8, 表 1)。さらに、自然条件下での供試体の挙動を検討するため、来待砂岩の割れ目を含まない供試体にひずみゲージを貼り付けて、同じ斜面上に静置した。ひずみ、開口変位のサンプリング周期は 60 分とし、気象データ(気温、相対湿度、降水量)は、現地測定を行った斜面から 4km 程度の距離のアメダス大月のデータ<sup>12)</sup>を参照した。

測定開始直後 1 か月分の測定結果を図 9 に示す。結果を図 9 に示していない測定のうち、C2 は C1 と、S1, S2, S5 は S8 と、S4 と S7 は S3 とそれぞれ同様の傾向で変動していた。図 9 では温度や湿度に対応する変位やひずみの変動が認められるが、以下で述べる高温時とは例えば経過時間 D<sub>1</sub> を、多湿時とは例えば経過時間 D<sub>2</sub> を参照されたい。亀裂変位計 C1 では、1 日周期の開口変位変動がみられ、高温時や多湿時に閉口する傾向であった(図 9(a))。また、割れ目をまたぐひずみゲージ S8 は、C1 の変動と同様に、高温時や多湿時に収縮する傾向であった(図 9(b))。割れ目をまたがないひずみゲージでは、概ね気温の変化に同期して高温時に膨張する傾向で、一部のゲージでは多湿時にもやや膨張した(図 9(c), (d))。以上を総括すると、割れ目をまたがないひずみゲージ S3, S6 とまたぐひずみゲージ S8 や亀裂変位計 C1 の結果から、高温、多湿時等の母岩の膨張時には割れ目は閉口し、母岩の収縮時には割れ目は開口する挙動と考えられる。

また、斜面に静置した来待砂岩供試体では、気温変動によると考えられる変形に加えて、2 日頃までや降水時に急激な膨張がみられた(図 9(e))。降水後は、長期的には徐々に収縮する傾向であり、岩石が乾燥する過程を反映したものと考えられる。また、2 日頃までの毎時 0.5mm 以下の少量の降水と、11~12 日頃の毎時最大 4.5mm の降水での膨張の大きさに大きな差はなく、一定程度の降水があるとひずみの変動が頭打ちになると考えられる。来待砂岩供試体の降雨時応答は、岩盤の割れ目をまたがない岩石部分の降雨時応答より明瞭であり、来待砂岩は現地測定対象の安山岩に比べ吸水しやすいと考えられる。

#### 4.2.4 室内試験結果と現地測定結果の総括

気温や湿度変化に対する変形の傾向については、室内試験では雰囲気温度変化時に即座に発生する熱変形に加え、24 時間程度の時間をかけて発生する含水比変化による変形がみられた。現地測定の結果、室内

試験と同様の变形に加え、降雨に伴う膨張がみられる場合があった。吸水の影響の大きさは岩種によって異なり、現地測定箇所で露出していた安山岩よりも、来待砂岩で大きいと考えられた。これは、来待砂岩で細孔径が大きく、透水性が高かったことによる可能性がある。また、現地測定では、岩石の収縮時に割れ目が開口する傾向であった。

全体として、岩石の熱変形は気温変化に比例して即座に応答する一方、吸水に伴う変形には不明瞭な点が多いため、気象変化による変形の予測に向けて、吸水に伴う変形に関する考察が重要だと考えられる。

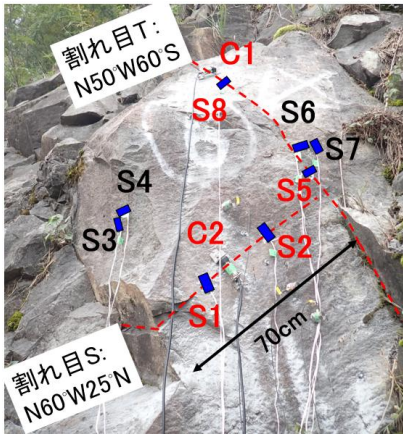


図8 測定対象の岩塊

表1 現地測定における測定対象

	岩盤斜面上の岩塊 (図8)			岩石供試体 (来待砂岩)
	割れ目Tをまたぐ	割れ目Sをまたぐ	割れ目をまたがない	
亀裂変位計	C1	C2	—	—
ひずみゲージ	S5,S8	S1,S2	S3,S4,S6,S7	S15

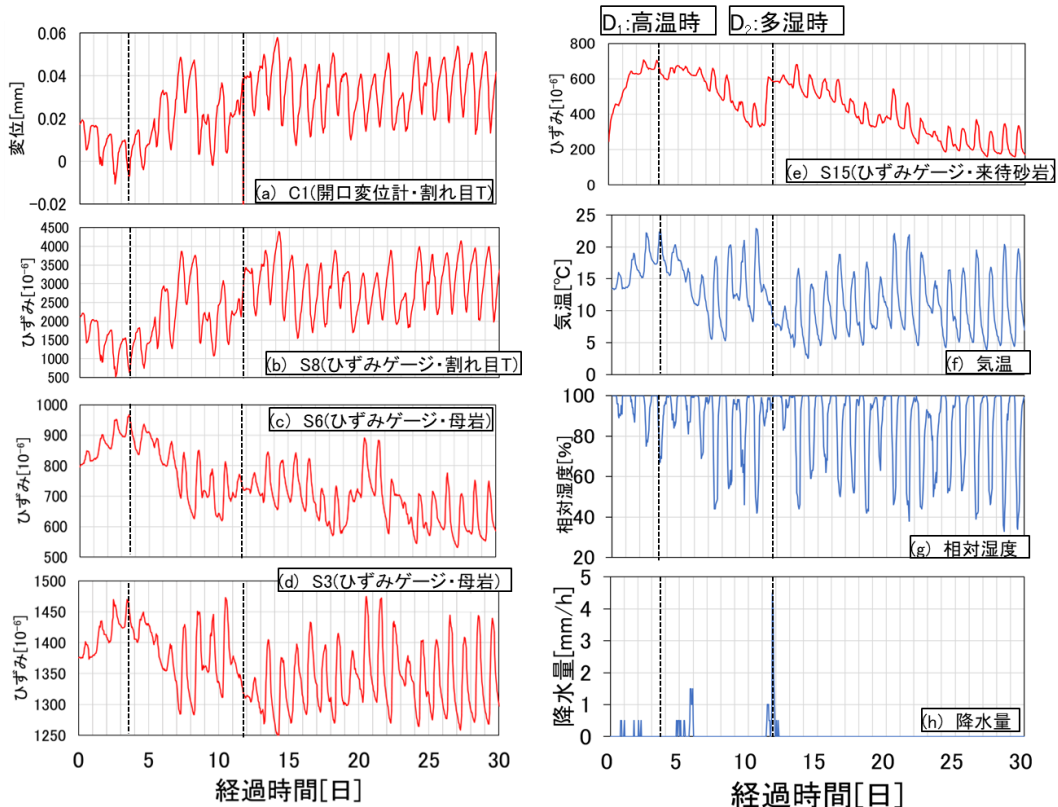


図9 現地測定結果と気象データの例(1か月分、気温最高、降水量最大の時刻を黒点線で示す)

## 5. 岩石中の応力変化予測式

### 5.1 温度・湿度変化による変形に関する予測式の構築・検証

前章の試験結果を踏まえ、温度・湿度変化による岩石の変形応答の予測式を構築する。熱変形と含水状態

の変化による変形が発生するが、これらの2つの要因は、発生する時間スケールが異なる。そこで、本節では、ひずみ $\varepsilon$ が、式(5)のように熱変形に由来する $\varepsilon_T$ と、含水状態の変化に由来する $\varepsilon_H$ に分離されると仮定して考察する。

$$\varepsilon = \varepsilon_T + \varepsilon_H \tag{5}$$

まず、雰囲気温度 $T$ における $\varepsilon_T$ は、線膨張係数 $\alpha$ 、ある雰囲気温度 $T_0$ での $\varepsilon_T$ の値を用いて以下のように表せる。

$$\varepsilon_T(T) = \varepsilon_T(T_0) + \alpha(T - T_0) \tag{6}$$

次に供試体の吸湿と、水分の蒸発が可逆一次反応であると仮定すれば、含水比 $w$ について以下の式が成立する。

$$\frac{dw}{dt} = -k(w - w_e) \tag{7}$$

なお、 $t = 0$ での初期値を $w_0$ とし、 $w_e$ を定数として式(7)を解くと、式(2)が得られる。前章と同様にして、 $\varepsilon_H$ と $w$ に線形関係があると仮定すると、 $\varepsilon_H$ の平衡状態における値 $\varepsilon_{He}$ を用いた、以下の式が成立する。

$$\frac{d\varepsilon_H}{dt} = -k(\varepsilon_H - \varepsilon_{He}) \tag{8}$$

式(8)において、 $k$ は式(4)に従い、 $\varepsilon_{He}$ は温度、湿度により変化する。 $\varepsilon_{He}$ は、岩石の吸水反応を、岩石表面の吸着サイトへの水蒸気の吸着反応とみなし、その平衡定数が反応エンタルピー $\Delta H$ のファントホッフの式に従うこと、ひずみと吸水量の変動量が比例することを仮定した場合、水蒸気圧 $P_w$ と定数 $\varepsilon_{Hc}$ 、 $\varepsilon_{He0}$ を用いて以下のように表せる<sup>3)</sup>。

$$\varepsilon_{He} = \varepsilon_{Hc} P_w \exp\left(-\frac{\Delta H}{RT}\right) + \varepsilon_{He0} \tag{9}$$

$\varepsilon_H$ は、式(8)に式(9)で求まる $\varepsilon_{He}$ 、式(4)で定まる $k$ を代入して数値的に解くことで算出できる。

予測式(6)と(8)に関し、4章の室内試験のステップ変化過程の試験結果をもとに定めたパラメータ設定を用い、線形変化過程の測定結果の再現を試みることで検証した。パラメータ設定の詳細は文献3を参照されたい。

予測式を用いて計算を行った結果、相対湿度が変化した場合、温度が変化した場合ともに、予測値は実測値をよく再現していた(図10, 図11)。この結果から、温度や湿度がステップ状でない変化を示す場合であっても、来待砂岩のひずみの変動が予測可能だとわかった。

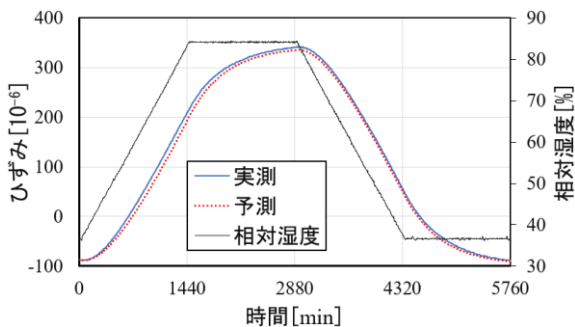


図10 ひずみ予測値と実測値の時間変化 (相対湿度線形変化時)

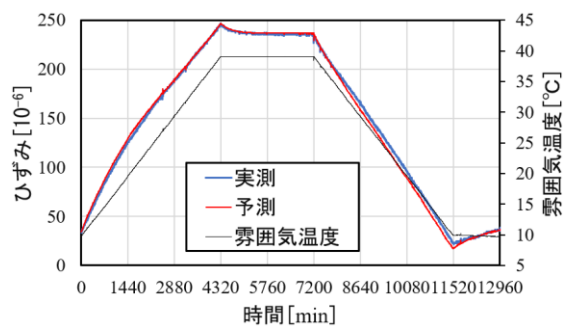


図11 ひずみ予測値と実測値の時間変化 (温度線形変化時)

### 5.2 降雨の効果を検討した岩石の変形予測式

本節では、より実斜面への適用性の高い変形予測式の構築を試みる。実斜面では、熱変形 $\varepsilon_T$ は室内試験と同様と考えられるが、降雨直後の膨張が大きく、その後膨張状態が維持される（図9(e)）ため、 $\varepsilon_H$ の変動には降雨履歴の影響も考えられる。これを踏まえ、 $\varepsilon_H$ は、式(9)に代わり、降雨履歴の影響を考慮した式(10)を用いて求めた。

$$\varepsilon_{He} = \varepsilon_{Hc} P_w \exp\left(-\frac{\Delta H}{RT}\right) + \varepsilon_R R(t) + \varepsilon_{He0} \tag{10}$$

ここで、 $\varepsilon_R$ は定数、 $R(t)$ は時刻 $t$ における実効雨量を表し、過去の時刻 $s$ における1時間雨量 $r_s$ 、実効雨量の半減期 $\tau$ を用いて、以下のように表せる。

$$R(t) = \sum_{s=0}^t (0.5)^{\frac{t-s}{\tau}} r_s \tag{11}$$

また、降雨が続いた場合、ひずみの値が頭打ちとなることが確認されている（図9(e)）。このことは、岩石表面における吸水量に上限が存在することに起因すると考えられる。これを踏まえ、 $\varepsilon_H$ は、式(8)で求まる値と定数として定めた上限値 $\varepsilon_{max}$ のうちの小さいほうの値とした。

この予測式の適用可能性を検証するため、実斜面に静置した来待砂岩供試体の測定結果（図9(e)）をどの程度再現可能か検討した。ひずみの初期値や降雨に対する応答の大きさ等に関するパラメータを、測定値をもとに定めた<sup>3)</sup>うえで予測値を計算した結果、概ね実測されたひずみの増減の傾向を再現できた（図12）。

### 5.3 割れ目を含む岩石の変形と応力の関係

割れ目を含む岩石の気象変化に伴う変形と、応力の関係について考察を行う。岩石に雰囲気温度や湿度の変化による変形が発生する場合、岩石内に含水比や温度の勾配が発生し、その結果として応力が発生することが考えられる<sup>6) 13)</sup>。例として、図13のように、中央に割れ目を含み、空気に触れる面以外の全ての面を拘束された岩石に対して、割れ目の開口部側で温度や湿度の変化が加わる状況を考える。このとき、例えば雰囲気の温度が低下した場合は、岩石の内部で温度が高く、表面で温度が低くなるような温度勾配が生じる。このような温度勾配は、表面に近づくほど収縮が大きくなるような変形をもたらし、割れ目先端部では割れ目が開く傾向の引張応力が発生する。このとき、割れ目の先端で発生する応力の大きさは、割れ目の形状にも依存するが、割れ目開口部分の変位の増加分と概ね比例し、これは岩石の表面における収縮の大きさと比例すると考えられる。また、同様の現象は降水や湿度変化等の乾湿変化が発生し、岩石

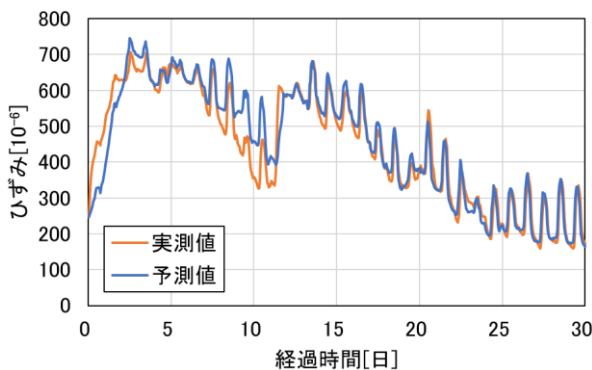


図12 実斜面におけるひずみ実測値と降雨を考慮した予測値の例

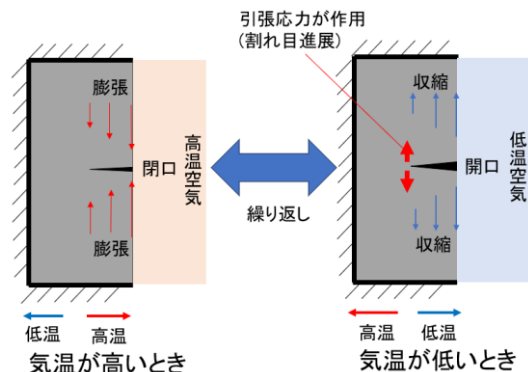


図13 繰り返す温度変化時の岩石の変形と割れ目に作用する引張応力の関係の例

内に含水比勾配が生じた場合にも発生すると推測される。

4.1.3 項の C1 と S3 の測定結果では、S3 で膨張ひずみが観測されたときに割れ目が閉じる傾向の変化となっており、測定を行った岩塊でも、図 13 のモデルに近い現象の発生が考えられる。以上から、実際の斜面でも、割れ目の先端には、割れ目を含まない岩石部分の収縮ひずみの大きさに概ね比例した引張応力が生じる場合が多いと推測され、前節までのひずみ変化の算出手法は、引張応力変化の算出手法として利用可能であると考えられる。

## 6. 乾湿繰り返しによる割れ目進展に関する試験

4 章の試験結果、ならびに温度変化よりも乾湿変化の繰り返しの方が岩石の劣化に大きく寄与するとして先行研究<sup>14)</sup>を踏まえ、検討事項 β に関して乾湿繰り返し作用に対する割れ目の進展特性を把握する試験を行った。

### 6.1 試験方法

初期条件の制御のため、試験には自然の割れ目を含んだ岩石供試体ではなく、人工的な模擬割れ目を設けた供試体を用いる方針とした。4 章で用いた供試体と同サイズの、15mm×30mm×130mm の角柱状供試体に、割れ目を模擬することを意図して、15mm×130mm の面に直交し、かつ長さ 130mm の辺を垂直二等分するよう超音波加工機で長さ 15mm の切欠きを設けたものを試験に用いた(図 14)。この形状は、材料の破壊靱性試験である ASTM E399-20 試験<sup>15)</sup>(以下、ASTM 試験とする)で用いる供試体と同一である。

実際の斜面では割れ目に対して岩石の自重による応力が作用した状態で気象変化による含水比変化が生じることを踏まえ、試験は载荷条件下で、乾燥と浸水の繰り返しを与える方針とした。そのため、新たに試験治具を考案した(図 15)。この試験治具は、三点曲げ試験において、圧子を変位調整ねじによって固定できる構造としたもので、全体を水槽に浸水させることができる。調整ねじはロードセルを介して圧子を押す構造で、供試体上面中央の上方への変位を固定する機能を有し、試験開始時に下向き初期変位を導入することで、供試体中央上面に载荷力が生じる。ただし、試験中に供試体が膨張すれば载荷力は増加、収縮すれば減少する。また、調整ねじとロードセルの間は、調整ねじの回転成分をロードセルに伝えないように球座で接続しており、調整ねじは引張力を負担しないことから、岩石の収縮や割れ目の進展等により供試体上面が下向きに変位すると、初期に導入した変位による载荷力が減少することで、载荷力はロードセルから圧子までの重量(約 5~10N)まで低下する。供試体を切欠きが下側になるように設置し、治具を用いて载荷を加えた状態で、乾湿繰り返し試験を行った。乾湿変化は、治具を水槽の中に入れ、供試体全体が浸る量の水を出し入れして発生させ

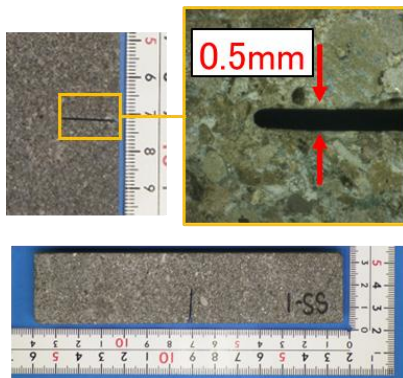


図 14 作製した模擬割れ目を含む供試体

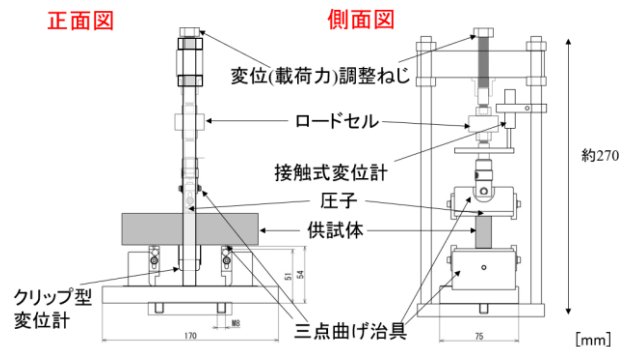


図 15 乾湿繰り返し試験に用いた治具

た. その間雰囲気温度は40°Cに保った. 試験は, 48 時間以上の乾燥と24 時間の浸水を1 サイクルとし, それを20 回繰り返した. 試験中は, 切欠き部の開口変位および載荷力を1 分に1 度測定した. 初期の載荷力は10N, 30N, 50N の3 通りとし, 試験開始時に所定の初期載荷力となるように調整ねじを操作し, その後は調整ねじを操作しないこととした.

## 6.2 試験結果と考察

試験を行った結果, 初期載荷50N の供試体が1 サイクル目, 初期載荷30N の供試体が17 サイクル目の浸水過程の開始直後に破断した. 以下, サイクルごとの供試体の状態の変化について考察する際は, 1 サイクル中の増減過程における状態変化を把握できる前に破断した初期載荷50N の供試体を除いて考察する. 切欠き先端部の開口変位は, 浸水過程開始とともに増大, すなわち模擬割れ目が開く傾向の変化を示し, 浸水過程終了直後に最大値をとった後, 乾燥が進むと減少する傾向であった(図16). なお, 図中には, 5 サイクル目と6 サイクル目の結果の例を示しているが, サイクルによらずほぼ同様の傾向であった.

初期載荷10N, 30N の供試体において浸水過程開始と同時に発生した開口変位の増大の要因として, 岩石の吸水膨張のほか, 切欠きの入った供試体の下側が吸水しやすく, 含水比勾配によって発生した曲げ応力が切欠きに対して引張力として作用した可能性が考えられる. また, 浸水過程終了直後の増大は, 供試体の上側から空気に触れて含水比が低下するため, 浸水過程で発生した含水比勾配がより大きくなったためと考えられる. 乾燥過程では, 岩石全体での含水率の低下, 含水比勾配の解消により開口変位が減少したと考えられる. 各サイクル中の開口変位の最大値に着目して開口変位とサイクル数の関係を整理すると, サイクル数の増加につれて開口変位が増加する傾向であった(図17).

載荷力(図18)は, 初期載荷10N の供試体では, 5 日目(1 サイクル目の浸水開始)以降は概ね12N で一定であった. これに対し, 初期載荷30N の供試体では, 乾湿繰り返しサイクルのうち浸水開始直後に載荷力が急増し, その後の浸水過程でも乾燥過程よりも載荷力が大きい傾向にある. 初期載荷50N の供試体でも, 破断直前の浸水過程開始時に載荷力が増大している. これは, 浸水時の供試体の膨張によって, 供試体の上面が治具の圧子に押し付けられるような変形が生じたためと考えられる. また, 初期載荷30N の供試体では, 試験が進むにつれて浸水過程での載荷力の増加が小さくなる傾向がある. これは, 試験の進行に伴って供試体の変形し, 供試体の上面が下方向に変位した結果, 吸水膨張が発生した際に圧子に押し付けられる力が弱まったためと考えられる.

試験後の供試体に対し, 顕微鏡で観察を行った. 初期載荷10N の供試体では, 切欠きの先端付近から割れ目が粒界に沿うように曲がって進展しており, 長さは1.6mm 程度であった(図19左). 初期載荷30N の供試体でも, 切欠きの先端付近から割れ目が進展していた. 細かく見れば粒界に沿うように進展した結果, 曲がっている箇所はあるものの, 大きく見れば概ね切欠きの延長上で進展して破断に至っていた(図19右).

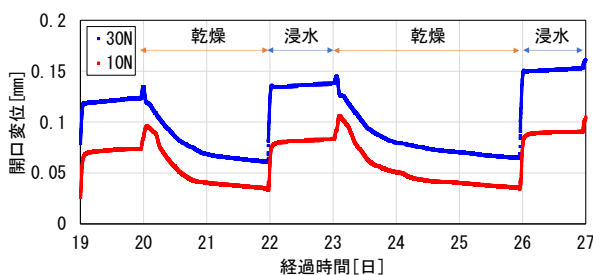


図16 乾湿サイクル中の開口変位変化の例 (5, 6 サイクル目)

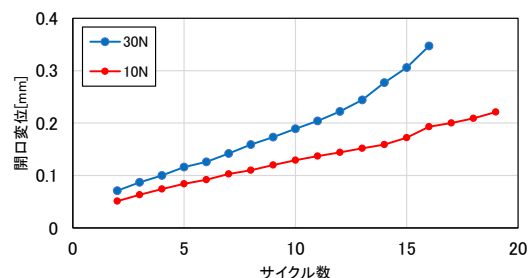


図17 試験サイクル数と開口変位の関係

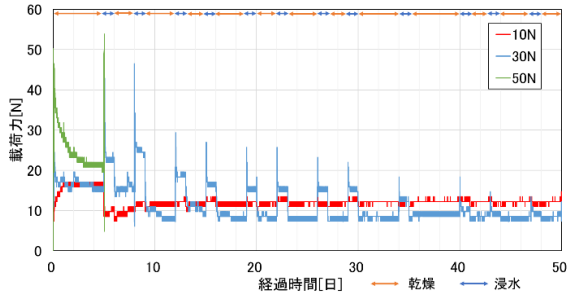


図 18 載荷力の変化の例(12 サイクル目頃まで)

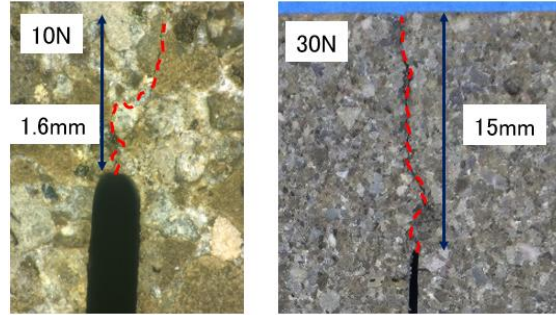


図 19 試験後の供試体

以上から、切欠きを設けた岩石供試体の三点曲げ試験において、供試体上面中央の上方への変位を拘束すると、乾湿繰り返しによって、供試体が膨張する際に割れ目が進展することを明らかにした。

## 7. 乾湿繰り返し作用による割れ目進展の理論式

式(1)のパリス則を、6章の試験条件を踏まえた形に書き換え、初期載荷 10N, 30N の場合の実験結果と比較することで、乾湿繰り返し作用による割れ目の進展に対する適用性を検討する。1 サイクルあたりの割れ目の長さ  $a$  の増分 (=  $da/dN$ ) が小さく、各乾湿繰り返しのサイクル中で同じ振幅の応力が作用すると仮定し、ASTM 試験 (図 20) の規格<sup>15)</sup> を踏まえると、パリス則は定数  $C_f$  を用いた以下のような形に書き換えることができる。

$$\frac{da}{dN} = C_f \left\{ f \left( \frac{a}{W} \right) \right\}^m \quad (12)$$

ここで、 $W$  は供試体の高さ、関数  $f(x)$  は本試験での応力拡大係数と割れ目の長さの関係を示し、

$$f(x) = \frac{\sqrt{x}\{1.99 - x(1 - x)(2.15 - 3.93x + 2.7x^2)\}}{2(1 + 2x)(1 - x)^{\frac{3}{2}}} \quad (13)$$

と書ける<sup>15)</sup>。式(12)の詳細な導出過程、および導出に用いた仮定の妥当性の検証は、文献 3 を参照されたい。

載荷力  $P$ 、割れ目の開口変位  $V$  と、割れ目の長さ  $a$  は、供試体のヤング率  $E$ 、幅  $B$ 、三点曲げ試験の支点間隔  $S$  を用いると、以下のような関係にある<sup>15)</sup>。

$$\frac{a}{W} = 1.000 - 3.950U + 2.982U^2 - 3.214U^3 + 51.516U^4 - 113.031U^5 \quad (14)$$

$$U = \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{4EBW}{PS}} V} \quad (15)$$

以上の式(14)、(15)を用いて、各サイクル中の開口変位の最大値を割れ目の長さに換算したうえで、式(12)の各辺の値を計算して成立するか検証することで、本試験の結果に対するパリス則の適用可能性を検討した。

式(12)の各辺の値を両対数プロットした結果、初期載荷 10N の供試体では、 $da/dN$  と  $f(x)$  との関係は明瞭でなかった (図 21(a))。一方、初期載荷 30N の供試体では、 $f(x)$  が大きいとき、すなわちある程度割れ

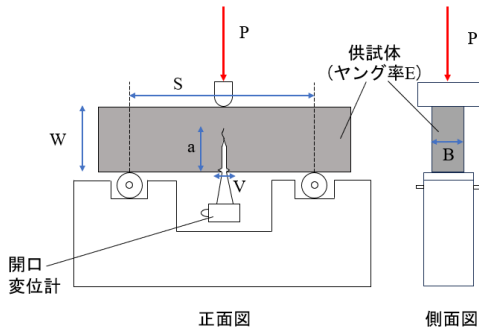


図20 ASTM E399-20 試験の概要

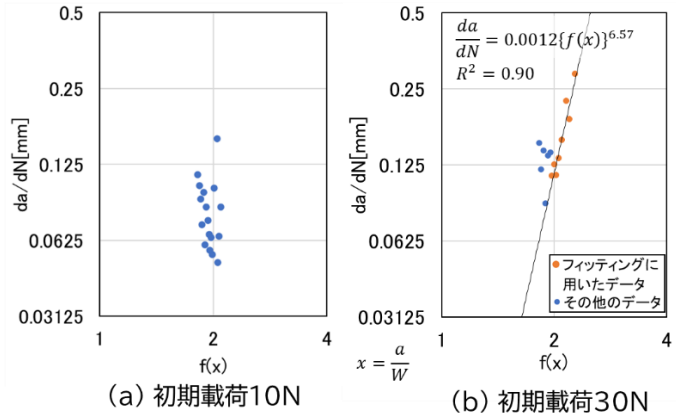


図21  $f(x)$ と $da/dN$ の関係

目が進展した後半のサイクルで $da/dN$ が増大する傾向にあり、かつ、その増大速度は両対数プロット上で直線になっており、パリス則で想定されるべき乗関数型に近い。破断直前の8サイクル分(図21において $f(x) > 1.97$ の範囲のプロット)のデータを用いて、最小二乗法で式(12)にフィッティングを行うと、 $C_f = 0.0012$ 、 $m = 6.57$ で良く再現できた(図21(b))。このことから、割れ目は $m = 6.57$ のパリス則に概ね従って進展したと解釈できる。また、荷重力 $P$ の変動は一定という仮定のもと得た式(12)で試験結果を再現できたことは、供試体中の含水量の変化に伴う応力変化の繰り返しが割れ目の進展に対して支配的で、パリス則が乾湿変化の繰り返しに伴う割れ目の進展に適用可能であることを示唆する。

## 8. 乾湿変化による割れ目進展速度の予測手法と割れ目進展スコアの提案

### 8.1 割れ目の進展速度予測手法の構築

ここまでの検討結果を、実岩盤で測定可能な気象データを用いた危険度評価につなげるための試行として、5章で提案した、降雨の効果を考慮した変形予測式と7章で適用可能性を確認したパリス則を統合し、気象データから実岩盤での割れ目の進展速度を相対評価可能な予測手法を構築する。

パリス則では、1回の応力変動による割れ目の進展は応力拡大係数振幅のべき乗に比例する。ここでは、割れ目は、引張応力が作用する際に進展すると考えられること、現地測定では、割れ目をまたがない岩石部分のひずみが減少する際に割れ目が開口したことを踏まえ、ひずみが単調減少を続ける期間を1回の応力変動とみなす。一般に、割れ目の長さの変動が小さい場合、応力拡大係数の変動の振幅は応力変動の振幅に比例することから、パリス則を踏まえると、1回の応力変動による割れ目の進展の大きさは応力変動の振幅の $m$ 乗に比例する。これに加えて、発生する応力変動がひずみの変動に比例するという仮定のもとでは、1回の応力変動による割れ目の進展長はひずみの変動の振幅の $m$ 乗に比例する。このとき、 $N$ 回の気象変化によるひずみ変化サイクルが経過後の割れ目の進展長 $a_N$ と $i$ サイクル目のひずみの変動の大きさ $\Delta\varepsilon_i$ を用いた、次の式が成立する。

$$a_N \propto \sum_{i=1}^N (\Delta\varepsilon_i)^m \tag{16}$$

式(16)に基づいて割れ目の長さを算出するには、割れ目の初期長さや、材料ごとに定まる定数が必要となる。しかし、これらを現地の岩塊に関して取得することは難しい。そこで、式(16)の右辺の値を各時刻における割れ目の進展しやすさを相対的に評価する指標として、割れ目進展スコアと定義する。なお、本研究

では、安定した評価を行うため、1回のひずみ変動の振幅に上限値を設け、それを上回った分の変形は別のひずみ変動として数えた。各気象条件の時系列データから割れ目進展スコアを算出するフローを、図22に示す。

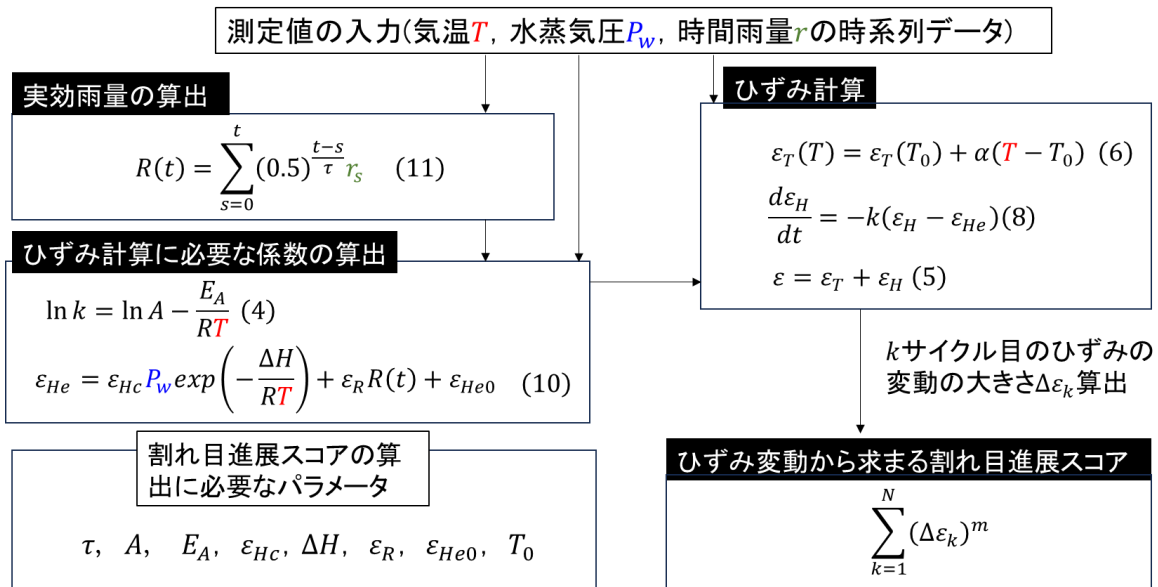


図22 割れ目進展スコアの算出フロー

## 8.2 割れ目進展スコアの試計算

割れ目進展スコアの適用可能性を検討するため、試計算を実施した。以下の検討では、1サイクルのひずみ変動の上限値を  $240 \times 10^{-6}$  とし、計算に用いるパラメータは5.1節、5.2節と同一とした。

本稿では、剥落型落石の発生時期と、気象条件から算出できる割れ目進展スコアの対応関係を検討した。剥落型落石の発生時期のデータは、北海道の道路斜面で1998年から2008年間に発生した剥落型落石の発生時期を月ごとに分類したデータ<sup>16)</sup>を用いた。割れ目進展スコアは、2地点の気象データをもとにそれぞれ求めた。1つの地点は、地理的に北海道の中央に近いアメダス旭川、もう1つは集計対象となった剥落型落石の発生地点のうち約6割から50km以内の距離にあるアメダス小樽で、2地点の距離は約130kmである。剥落型落石の発生時期と比較する各月の割れ目進展スコアは、以下のように求めた。

まず、各地点のデータに関して、1998年1月から2008年12月の各月(計132か月)における期間中の割れ目進展スコアの合計を算出した後、1月~12月の各月において、1998年~2008年の11年分の平均をとり、その結果を各月の合計が1になるように正規化した。

計算した割れ目進展スコアは、旭川と小樽のどちらの地点でも概ね類似した傾向を示し(図23)、冬季(11月から3月頃)には小さい傾向にあって、5月や6月に大きくなる傾向にある。このことから、割れ目進展スコアを実際に斜面での防災対策に活用する場合に、100km程度距離が離れたアメダス測定点の気象データを用いた評価でも大きな差が生じない場合があることが示唆される。

剥落型落石の発生頻度と割れ目進展スコアの關係に着目すると、剥落型落石の発生頻度は、3月と4月を除けば割れ目進展スコアと似た変動となっている。各測定点で算出された割れ目進展スコアを比較すると、9月の落石発生件数の増加は、小樽の割れ目進展スコアでよりよく再現されている。すなわち、本検討では、より多くの剥落型落石の発生地点から近い小樽の割れ目進展スコアが、剥落型落石の発生頻度分布をよりよく再現することがわかった。ただし、剥落型落石の発生頻度のデータ数が少なく、データの統計的な信頼性が十分でないこと、集計対象となった剥落型落石の3割程度はアメダス小樽から100km以上離れた場所で発生してい

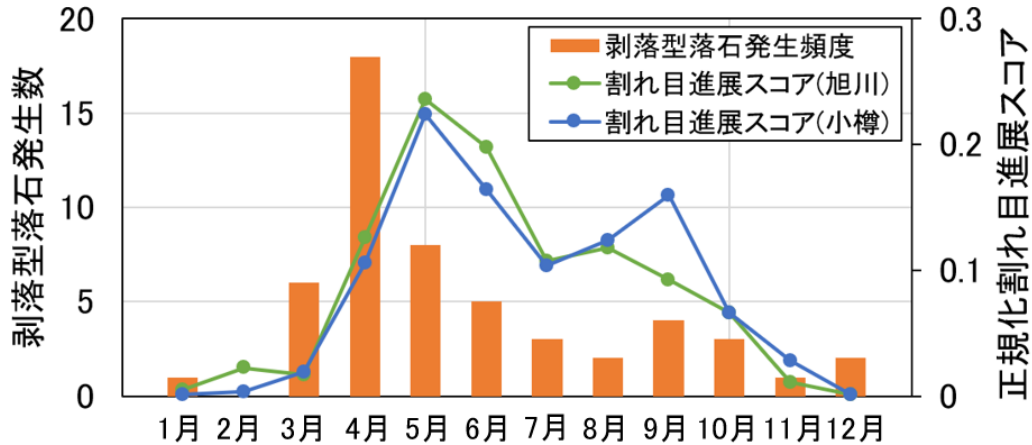


図 23 割れ目進展スコアと剥落型落石発生数の関係

て、小樽の割れ目進展スコアの変動と対応した頻度分布で発生する蓋然性が低いことには留意する必要がある。

使用した剥落型落石の発生時期データの中で、3月と4月の頻度が高いのは、融雪や凍結融解の作用によるものが含まれる<sup>16)</sup>ことの影響が考えられる。割れ目進展スコアの算出にあたっては、温度変化や乾湿変化による変形のみが考慮されており、融雪による水の供給や凍結融解による応力は考慮されていないため、乖離が生じたものと考えられる。

以上を踏まえ、割れ目進展スコアの地域による違いを考慮して、相対的な割れ目の進展しやすさの違いを把握することができると考えられる。今後、岩種による吸水特性の違いを考慮して個別の斜面における適用可能性を高める、落石発生事例のデータ収集をさらに進めて検証を行うなど、割れ目進展スコアを踏まえた、より詳細な剥落型落石の危険度評価につなげていく必要がある。また、今後、割れ目進展スコアを利用してより精度の高い剥落型落石の危険度評価を行うには、凍結融解や融雪の効果の大きさを評価し、発生する応力サイクルの一部として組み込む必要があると考えられる。

## 9. まとめ

浮き石となった岩塊が岩盤斜面から落下する剥落型落石は、割れ目を含む岩盤で発生する。剥落型落石の危険度評価の確度向上を目的として、岩石中の割れ目の進展を予測するモデルを作成することを目標に、室内試験と現地測定を実施した。得られた成果は次の通りである。

- (1) 室内試験において温度や湿度の変化に伴う岩石の変形を測定し、熱変形による急激な変形と、乾湿変化による緩慢な変形があることを明らかにした。熱変形は温度上昇時に膨張、乾湿変化による変形は湿度上昇時と温度低下時に岩石が膨張する傾向であった。さらに、岩盤斜面における現地測定でも同様の傾向であることを示した。
- (2) 多孔質材料の吸湿理論に基づき、温湿度変化に伴う岩石の変形予測式を提案し、試験結果をよく再現できることを示した。
- (3) 人工的な模擬割れ目を含む供試体を作製し、それを用いて乾湿繰り返し作用による割れ目の進展を把握できる室内試験方法を新たに考案した。さらに、既往の割れ目の進展に関する理論式に基づき、ある程度の長さの割れ目が直線的に進展した場合の試験結果を再現できる割れ目の進展速度予測式を提案した。
- (4) (2)と(3)の成果を統合し、気象変化による割れ目の進展速度予測手法を構築した。時系列気象

データを入力して得られる結果を「割れ目進展スコア」と定義し、割れ目の進展可能性を評価する指標として提案した。割れ目進展スコアは、過去の剥落型落石の月別の頻度分布と類似した傾向を示すことを確認した。

## 文 献

- 1) 鉄道総合技術研究所：落石対策技術マニュアル，2019
- 2) 中島巖，根岸正光：節理構造岩盤斜面における落石の発生機構—寒冷地における岩盤斜面崩壊に関する研究（第3報）—，応用地質，Vol.35，No.3，pp.11-21，1994
- 3) 久河竜也，浦越拓野，河村祥一：気象条件の変化による岩石の割れ目進展性評価モデル，土木学会論文集，Vol.81，No.10，論文ID 25-00058，2025
- 4) Paris, P. and Erdogan, F.: A critical analysis of crack propagation laws, J. Basic Eng., No.4, pp.528-533, 1963.
- 5) Migliazza, M., Ferrero, A. M. and Spagnoli, A.: Experimental investigation on crack propagation in Carrara marble subjected to cyclic loads, International journal of rock mechanics and mining sciences, Vol.48, No.6, pp.1038-1044, 2011.
- 6) Kirane, K. and Bažant, Z.P.: Size effect in Paris law and fatigue lifetimes for quasibrittle materials: Modified theory, experiments and micro-modeling, International Journal of Fatigue, Vol.83, pp.209-220, 2016.
- 7) Jimenez Gonzalez, I. and Scherer, G.W.: Effect of swelling inhibitors on the swelling and stress relaxation of clay bearing stones. Environmental Geology, Vol.46, pp.364-377, 2004.
- 8) Eppes, M. C. and Keanini, R.: Mechanical weathering and rock erosion by climate-dependent subcritical cracking, Reviews of Geophysics, Vol.55, No.2, pp.470-508.
- 9) Collins, B. D. and Stock, G. M.: Rockfall triggering by cyclic thermal stressing of exfoliation fractures. Nature Geoscience, Vol.9, No.5, pp.395-400, 2016.
- 10) 八田敏行，熊坂博夫，木下直人，安部透：天然のき裂を含む花こう岩質岩石の熱膨張特性，土木学会論文集，No.750，III-65，pp.183-191,2003
- 11) 村田敏，田中史彦，アマラトゥンガ K.S.P.，澁谷和子，内野敏剛：精白米の吸湿過程における平衡含水率の測定—初期含水率の平衡含水率に与える影響—，農業機械学会誌，第57巻，第6号，pp.45-52，1995
- 12) 気象庁：過去の気象データ検索，<https://www.data.jma.go.jp/stats/etn/index.php>（参照日：2025年11月12日）
- 13) 鶴戸口英善：熱応力問題の考え方，日本機械学会誌，Vol.65，No.525，pp.1454-1464，1962
- 14) 河村祥一，嶋本敬介，川越健：来待砂岩の強制劣化試験と強度低下速度，土木学会論文集 C(地圏工学)，Vol.77，No.4，pp.348-359，2021
- 15) ASTM E399-20: Standard Test Method for Linear-Elastic Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials, 2020.
- 16) 日外勝仁，伊東佳彦：北海道における道路斜面災害事例の分析と崩壊履歴調査の検討，情報地質，第20巻，第2号，pp.66-69，2009

## 燃料電池車両の技術基準を定める告示・同解釈基準の概要

八島 悠太\* 米山 崇\* 水野 寿洋\*\* 遠藤 康信\*\*

### Outline of Public Notice and Interpretative Standard of Technical Standard for Fuel Cell Trains

Yuta YASHIMA Takashi YONEYAMA Toshihiro MIZUNO Yasunobu ENDO

A public notice establishing the technical standards for fuel cell trains was issued in March 2025. In November of that year, an interpretative standard for these standards was issued. The public notice establishes technical standards for “compressed hydrogen gas” as a hydrogen carrier and “fuel cells” as power generation equipment. These standards were formulated based on safety verification results. The establishment of these technical standards is expected to accelerate the early introduction of fuel cell railway vehicles into practical use.

キーワード：水素，燃料電池車両，技術基準，リスクアセスメント，高圧ガス

### 1. はじめに

2050年カーボンニュートラルや水素社会の実現に向けて、鉄道事業者では圧縮水素ガスを燃料とする車両（以下「燃料電池車両」という）の技術開発が進められている。2025年3月に燃料電池車両の社会実装を進めるために「鉄道に関する技術上の基準を定める省令（以下「技術基準省令」という）」第68条が改正されるとともに、「圧縮水素ガスを燃料とする車両の燃料電池等の技術上の基準を定める告示（以下「水素告示」という）」が制定された<sup>1)</sup>。また、同年11月に法的な強制力を持たない形で具体化・数値化して明示している「解釈基準」が改正され、水素告示の内容が整備された<sup>2)</sup>。本稿では、これらの制定の概要について紹介する。

### 2. 燃料電池車両の技術基準制定の経緯

燃料電池車両は、車両に搭載した水素と空気中の酸素を燃料電池で化学反応させ、得られる電力により走行する車両である。発電後の排出物は水のみであり、二酸化炭素を排出しないことから、気動車の置換えの選択肢の一つとして位置づけられている。水素は分子量が極めて小さく低密度のため、高いエネルギー密度を確保するために35MPaや70MPaといった高圧に圧縮し、専用容器に充填して車両に搭載される。水素に限らず1MPa以上の高圧ガスは高圧ガス保安法の適用対象となり、燃料電池車両においては圧縮水素を貯蔵する容器及び附属品（容器に直接取付けられる部品。鉄道用の容器（圧縮水素鉄道車両燃料装置用容器）では「主止弁、容器逆止弁、容器安全弁」をいう。）を含む、充填口から減圧弁までの1MPa以上の部分が対象となる。一方、高圧ガス保安法には燃料電池車両での容器等の取扱いに関する規定が存在しなかったため、従来は経済産業大臣特認制度に基づき、個別に安全性を確認した上で特例的な措置として運用されてきた<sup>3)</sup>。また、鉄道の技術基準においても燃料電池をはじめ水素関連機器に関する規定が存在しなかったため、鉄道営業法において特別な取扱いとして構造を確認していた<sup>3)</sup>。今後の円滑な社会実装を鑑み

\* 車両技術研究部 エネルギーシステム研究室

\*\* 国土交通省 鉄道局 技術企画課

ると、鉄道の技術基準で所定の手続きを行えることが望ましいため、高圧ガス保安法上の技術基準の一部を鉄道の技術基準に移管することを前提に、関係省令等の改正が行われることとなった。

## 2.1 鉄道車両の技術基準の体系

鉄道車両の技術基準の体系を図1示す。鉄道の技術基準は、鉄道営業法第1条に基づき制定された技術基準省令により規定されている。技術基準省令は、鉄道輸送に供される設備及び車両の構造並びにその取扱いに関する必要な要件を定めることで安全・安定輸送の確保を図り、公共の福祉の増進に資することを目的としており、法的強制力を有する<sup>4)</sup>。さらに、技術基準省令を補完し、同様に法的強制力を有するものとして「告示」があり、「特殊鉄道に関する技術上の基準を定める告示」、「施設及び車両の定期検査に関する告示」及び「技術基準省令第2条第20号の危険品を定める告示」がある。これらの下位には、鉄道事業者の技術的判断の参考とすることを目的に「解釈基準」や、鉄道事業者の実務に資することを目的として技術基準省令、告示及び解釈基準の背景となる考え方や技術的根拠を取り纏めた「解説」がある<sup>4)</sup>。鉄道事業者は、技術基準省令及び告示に適合する範囲内で、解釈基準や解説を参照しながら、自社の実情に即した「実施基準」を策定し、これに基づき施設、車両の設計、運転取り扱い等を行うことになる。

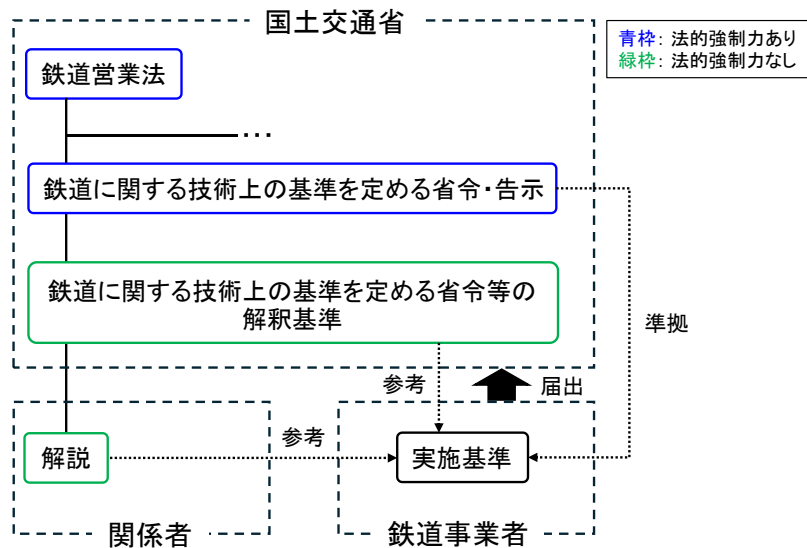


図1 鉄道車両の技術基準の体系

## 2.2 燃料電池車両の技術基準の制定

### 2.2.1 燃料電池車両の安全性検証

燃料電池車両は高圧の圧縮水素並びに発電のための燃料電池を搭載する車両であり、運用にあっては、実態に即した安全の確保が必要となる。特に最大70MPaという高圧の可燃性ガスを使用することへの安全性の担保は不可欠であり、想定されるリスクに応じた安全対策等の検討が重要となる。鉄道総研は、大学教授等の学識経験者、鉄道事業者、関係協会関係者及び経済産業省から構成される「水素燃料鉄道車両等の安全性検証検討会（以下「水素車両検討会」という）」（全6回）を国土交通省とともに運営し、あわせて燃料電池車両の安全性検証のためのリスクアセスメント及びリスク低減策の検討並びに技術基準案の提案を実施した。燃料電池車両は今後開発が進められる車両であることから、実績をベースとする技術基準の整備は困難である。そのため水素車両検討会では、国際規格（ISO/IEC Guide 51:2014）に定められるプロセスを基本とし、「経産省 リスクアセスメントハンドブック 実務編」を参考にリスクアセスメントによ

る安全性評価を実施した<sup>3)</sup>。リスクアセスメントの対象は、燃料電池車両の早期の社会実装を目指し、最も実用化に近い普通鉄道の旅客車とし、鉄道事故調査報告書を基に過去発生した鉄道事故を網羅したシナリオでリスクアセスメントを行い、リスクが高いと評価されたシナリオについては具体的なリスク低減策を検討した。その結果、燃料電池車両に必要と考えられる11項目のリスク低減策及び併せて整備することが望ましい対策が技術基準案として提言された<sup>5)</sup> (図2)。

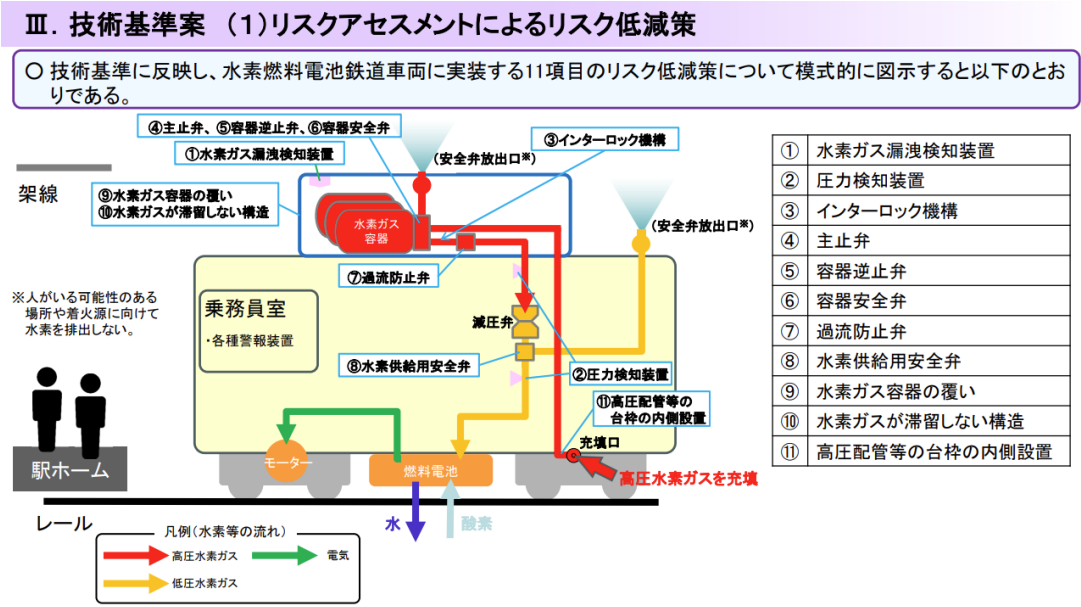


図2 水素車両検討会で提言された11項目のリスク低減策

出典：国土交通省 web サイト(<https://www.mlit.go.jp/tetudo/content/001844814.pdf>)

2.2.2 鉄道専用の水素ガス容器及び附属品の技術指針の制定

鉄道総研では、水素車両検討会と並行して、2024年度に大学教授等の学識経験者、鉄道事業者、関係協会・メーカーの有識者から構成される「水素燃料電池鉄道車両燃料装置用容器及び附属品の技術指針に関する検討委員会」(全3回)の運営を行い、鉄道の使用環境を考慮した鉄道専用容器及び附属品に関する審議を行った。その結果、経済性や入手性を考慮して既に実用化の進められている燃料電池自動車用容器と同等のものをを使用することを定めた「圧縮水素鉄道車両燃料装置用容器の技術指針」並びに「圧縮水素鉄道車両燃料装置用附属品の技術指針」が業界基準として制定された。本指針は、特別民間法人高圧ガス保安協会の運営する高圧ガス容器規格検討委員会における審議の結果、一般詳細基準として認められ、2025年11月に高圧ガス保安法に基づく経済産業省令である容器保安規則(以下「容器則」という)の例示基準(経済産業省が定めるもので、例示基準通りであれば高圧ガス保安法に適合するものとして認められる技術基準)に追加された<sup>6)</sup>。併せて容器則の告示に規定される容器の表示方式や再検査の規定についても、鉄道の運用に合わせた内容に改正された。

2.2.3 燃料電池車両の技術基準(水素告示)

高圧ガス保安法に基づく経済産業省令である一般高圧ガス保安規則(以下「一般則」という)に規定される高圧ガス設備の技術要件の一部を鉄道の技術基準へ移管することを前提に、水素車両検討会で提言された技術基準案を基として燃料電池車両に必要な構造・性能要件を整理し、技術基準が作成された。一般則は法的強制力を有することから、鉄道の技術基準に移管する際にも同様の枠組みを維持する必要がある。燃料電池車両の技術基準は法的強制力を有する「告示」として制定されることになった。告示の制定に際

しては、告示が紐づく技術基準省令が必要となるため、技術基準省令第 68 条（動力発生装置）第 4 項が追加されると共に、告示の解釈基準も併せて作成されることになった（図 3）。これらの作業は、水素車両検討会の運営及び技術基準案の取り纏めを行った国土交通省、鉄道総研を中心に、鉄道事業者等と見解に相違が生じないように議論を重ねながら進められた。告示の具体的な規定については、水素車両検討会で提言された技術基準案に加え、既に実用化されている燃料電池自動車の技術基準「道路運送車両の保安基準の細目を定める告示別添 100（圧縮水素ガスを燃料とする自動車の燃料装置の技術基準）」を参照しながら鉄道の技術基準として適したものになるよう作成が進められた。その結果、2025 年 4 月に全 8 条で構成される水素告示（表 1）が制定<sup>1)</sup>され、かつ、その適合性確認についても鉄道事業法第 13 条（車両の確認）に基づき実施されることからこれらの措置を踏まえ、一般則も改正された<sup>7)</sup>。

以上の通り、燃料電池車両に関する技術基準及び適合性確認が制度上明確に整備されたことから、今後の燃料電池車両の社会実装及び将来的な普及に向けた制度基盤が確立されたといえる。

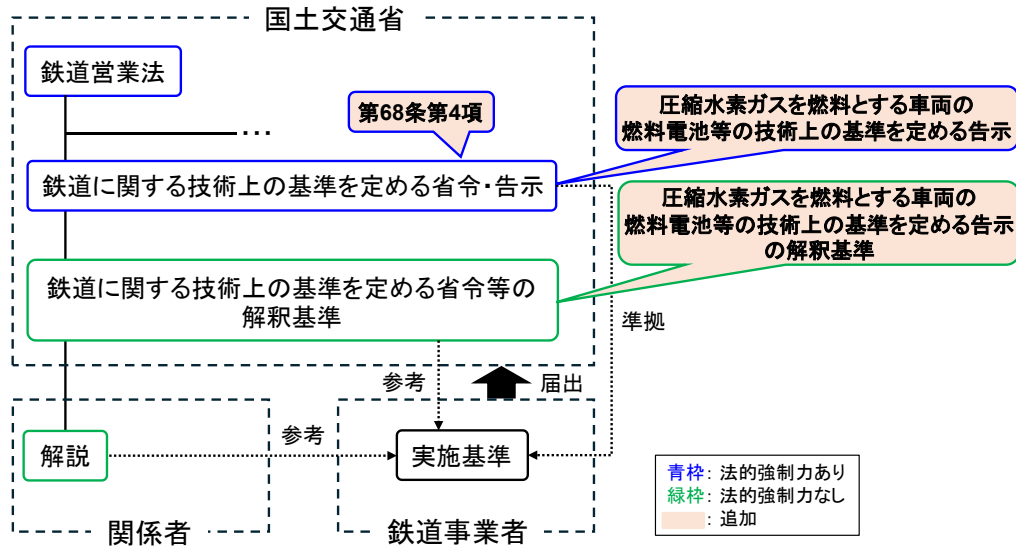


図 3 燃料電池車両の技術基準の体系

表 1 水素告示の目次

目次		記載事項
第 1 条	趣旨	技術基準省令第 68 条第 4 項と水素告示の関係
第 2 条	定義	用語(水素貯蔵システム, 燃料電池システム)の定義
第 3 条	要件	水素車両検討会の安全性評価の前提条件(対象車両, 水素の搭載量等)
第 4 条	水素貯蔵システム及び燃料電池システム	システムに求められる耐振動・衝撃性能及び燃料電池システムから排出されるガスの水素濃度
第 5 条	水素ガス容器	水素ガス容器・附属品に求められる性能, 取付位置等
第 6 条	水素配管等	水素ガスの流路の構成部品(水素ガス容器・附属品を除く)に求められる性能, 取付位置等
第 7 条	水素ガス漏えい検知器	水素ガス漏れ検知器の性能, 取付位置
第 8 条	乗務員室に設ける装置	圧力表示装置, 各種警報装置等の取付

### 3. 水素告示の概要

水素告示は、水素キャリアとして「圧縮水素ガス」、動力発生装置として「燃料電池」を適用範囲とする技術基準であることを明確にすべく「圧縮水素ガスを燃料とする車両の燃料電池等の技術上の基準を定める告示」という表題とした。また、鉄道事業者の理解の促進を図るため、システムや機器毎に条を分けるとともに、具体的な数字や規格、より詳細な内容を示す場合は解釈基準で示されることとなった。水素告示及び解釈基準に規定される内容を水素告示の条毎に以下に示す。

#### 3.1 趣旨（第1条）

第1条は、水素告示と技術基準省令第68条第4項との関係が規定されている。具体的には、技術基準省令第68条第4項に規定される「圧縮水素ガスを燃料とする車両の燃料電池等」の構造について、具体的な内容を定めたものが水素告示である。第1条で告示の趣旨を定義する構成は、他の告示と同様である。

#### 3.2 定義（第2条）

第2条は、燃料電池車両を構成する「水素貯蔵システム」及び「燃料電池システム」の用語の定義が規定されている。両システムの定義は以下の通りである。

- ・水素貯蔵システム：水素ガスを貯蔵し、燃料電池システムに水素ガスを供給するシステムをいう。
- ・燃料電池システム：水素貯蔵システムから供給される水素ガスを使用して発電をするシステム（空気供給装置、加湿装置及び温度調整装置を含む。）をいう。

両システムの構成図を図4に示す。水素車両検討会で提言されたりスク低減策は、高圧の圧縮水素を取り扱う水素貯蔵システムを対象としたものであり、その結果、同システムには各種の安全対策のための機器の搭載が必要となっている。

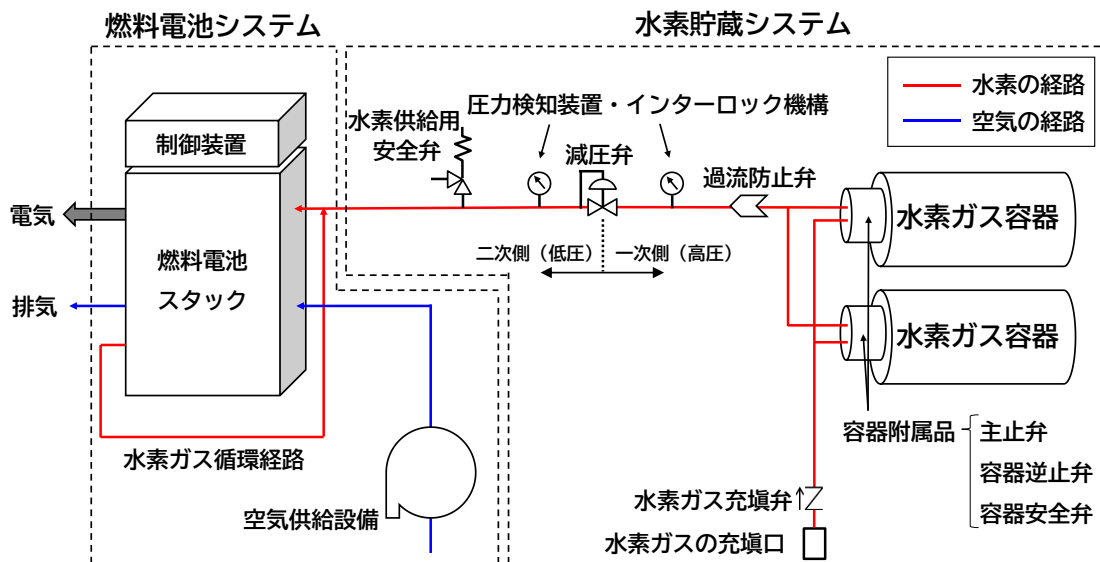


図4 水素貯蔵システム及び燃料電池システムの構成図

#### 3.3 要件（第3条）

第3条は、燃料電池車両に求められる要件が規定されている。これらは、水素車両検討会的前提条件を基に決められたものである。水素車両検討会では、以下の前提条件に基づき、燃料電池車両のリスクアセ

スメントが実施された。

- ・対象車両：鉄道事業法施行規則第4条に規定される普通鉄道のうち、旅客車
- ・集電装置：搭載しない
- ・水素の搭載量：1両あたり最大150kg

これらの前提は、水素告示でも適用されており、その要件が規定されたものが第3条である。対象車両については、水素告示では「普通鉄道」と幅広く定義されている。水素の搭載量については、高圧ガス保安法において気体の量が「容積（温度0度、圧力0Paの状態に換算したもの）」で示されることから、水素告示では質量150kgから容積1,670m<sup>3</sup>に換算した値で規定されている。なお、水素の搭載量の上限については、営業運転を想定した航続距離である300km以上を確保できることが前提とされた。具体的には2両編成の燃料電池車両（1両に水素及び燃料電池を搭載）の燃費を最大4km/kg-H<sub>2</sub>とすると、1両あたり約75kgの水素が必要となる。また、燃料電池自動車に関するリスクアセスメントでは、155kgの水素ガスの搭載について報告されていることから、これらを踏まえた基準値として1両あたり最大150kgが規定されることとなった。

### 3.4 水素貯蔵システム及び燃料電池システム（第4条）

第4条は、燃料電池車両を構成する両システムに求められる技術要件が規定されている。燃料電池車両を構成するシステム及び機器は、ガスの漏えい等の異常を防止するために、振動・衝撃に対する耐久性が求められる。鉄道車両においては、JIS E 4031(2013)「鉄道車両用品－振動及び衝撃試験方法」に具体的な試験方法が示されていることから、当該JIS規格への適合について解釈基準で示されている。さらに、燃料電池システムから排出されるガス中に高濃度の水素が含まれると着火の危険性があるため、モビリティ用途の燃料電池全般に適用される水素排出濃度の規制値について解釈基準で示されている。

### 3.5 水素ガス容器（第5条）

第5条は、水素ガス容器及び水素ガス容器に直接取付けられる附属品の構造・性能要件が規定されている。水素ガス容器及び附属品に関する規定の概要を表2に示す。本条は、燃料電池車両に搭載される水素ガス容器及び附属品が、容器則の改正により新たに追加された鉄道専用の水素ガス容器及び附属品の例示基準に適合していることを要求するものである。

表2 第5条水素ガス容器の規定の概要

機器	概要
水素ガス容器	<ul style="list-style-type: none"> <li>・「圧縮水素鉄道車両燃料装置用容器」であって、刻印等がなされていること</li> <li>・屋根上面に取付け、容易に取り外せない構造とすること</li> <li>・金属製の覆いを設けること</li> </ul>
附属品 (主止弁, 容器逆止弁, 容器安全弁)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・附属品を水素ガス容器に直接取付けること</li> <li>・「圧縮水素鉄道車両燃料装置用附属品」であって、刻印等がなされていること</li> <li>・容器安全弁が作動した時の放出方向は告示で決められた方向とすること</li> </ul>

### 3.6 水素配管等（第6条）

第6条は、水素ガス容器及び附属品を除く、水素ガスの流路を構成する各種機器に求められる性能、並びに構造上の要件が規定されている。第6条の規定の概要を表3に示す。本条は、水素貯蔵システムにお

ける大部分の構成機器を対象とすることから、水素車両検討会において提言されたりリスク低減策の多くが含まれている。その結果、本条は水素告示の中でも最も多岐に渡る規定を含む条文となっている。特に水素配管の性能要件に関しては、解釈基準にて一般則例示基準に示される材料を用いること、耐圧試験及び気密試験に合格する性能を有することなどが詳細に規定されている。

表3 第6条水素配管等の規定の概要

機 器	概 要
水素配管等	<ul style="list-style-type: none"> <li>・十分な気密性、耐久性、耐水素脆性をもつこと</li> <li>・床下に取り付ける場合は、台枠の幅の内側に配置し、車体前面、車体妻部及び連結した車両間に取り付けないこと</li> <li>・漏えいした水素ガスが滞留しない位置に取り付けること</li> <li>・使用環境に応じて適切に支持・固定されること</li> </ul>
水素ガスの充填口	<ul style="list-style-type: none"> <li>・容易に充填できる位置に取り付けること</li> <li>・電氣的な着火源から離れた位置に取り付けること</li> <li>・換気を十分に行うことができない場所に取り付けないこと</li> </ul>
水素ガス充填弁	<ul style="list-style-type: none"> <li>・水素ガスの充填口の直近に取り付けること</li> </ul>
減圧弁	<ul style="list-style-type: none"> <li>・水素ガスの圧力を 1MPa 未満に調整すること</li> <li>・主止弁より下流に取り付けること</li> </ul>
過流を防止する装置	<ul style="list-style-type: none"> <li>・過流防止弁を主止弁に直接又はその下流に取り付けること</li> </ul>
圧力検知・インターロック機構	<ul style="list-style-type: none"> <li>・水素ガス容器から減圧弁までの圧力の異常な低下を検知すること</li> <li>・異常時は自動的に主止弁を閉じること</li> </ul>
水素供給用安全弁	<ul style="list-style-type: none"> <li>・圧力異常時に水素を安全な方向に放出すること</li> </ul>

### 3.7 水素ガス漏えい検知器（第7条）

第7条は、水素ガスの漏えいを早期に検知し、漏えいを迅速に遮断するための安全機能として、水素ガス漏えい検知器の設置及び漏えいを検知した際に主止弁を自動的に遮断する機能を設けることが規定されている。水素は極めて小さい分子であることから、配管継手等からの漏えいリスクが相対的に高い。また、空気と比較して非常に軽く、漏えいした水素ガスは浮上して上部空間に滞留しやすい性質を有する。このため、漏えいした水素が溜まりやすいと想定される位置の上部に水素ガス漏えい検知器を設置することを規定し、その具体的な位置として、車両屋根上の水素ガス容器ユニット内上部や水素配管及び燃料電池システムが設置される台枠内の上部など水素ガスが漏えいした際に検知しやすい位置が解釈基準で示されている。

### 3.8 乗務員室に設ける装置（第8条）

第8条は、燃料電池車両の安全運行のために、乗務員に異常を知らせ、適切な対応を実施するための以下の装置等を乗務員室に設けることが規定されている。

- ・水素ガス漏えい検知器が水素ガスの漏えいを検知したことを警報する装置
- ・水素ガス漏えい検知器の機能に支障が生じたことを警報する装置
- ・主止弁を閉じることができる操作装置
- ・水素ガス容器から減圧弁までの水素配管等の内部の圧力を表示する装置

## 4. まとめ

燃料電池車両の社会実装に向け、水素車両検討会において安全性検証及びリスク低減策の検討が行われ、その成果を基に燃料電池車両の技術基準（水素告示，解釈基準）が整備された。今後、水素告示に適合した燃料電池車両を営業投入するためには、保全に関する技術基準の整備も不可欠である。これらの技術基準が整備されることにより、燃料電池車両の早期の営業投入が進み、鉄道分野におけるカーボンニュートラルの実現に寄与することが期待される。また、将来的には水素エンジンや液体水素等、新たな水素関連技術の発展に伴い、水素告示の適用範囲の見直しが求められる可能性がある。その際には、水素告示制定時と同様に、安全性の検証及びリスク低減策の検討を行い、新技術に対応した技術基準に改正していくことが求められる。

## 文 献

- 1) 国土交通省：「鉄道に関する技術上の基準を定める省令の一部を改正する省令」及び「圧縮水素ガスを燃料とする車両の燃料電池等の技術上の基準を定める告示」について、<https://www.mlit.go.jp/report/press/content/001882148.pdf> (参照日：2026年2月16日)
- 2) 国土交通省：鉄道の技術基準の整備，[https://www.mlit.go.jp/tetudo/tetudo\\_fr7\\_000036.html](https://www.mlit.go.jp/tetudo/tetudo_fr7_000036.html) (参照日：2026年2月16日)
- 3) 遠藤康信：燃料電池車両の安全性検証，JREA，Vol68，No.9，pp.31-34，2025
- 4) 国土交通省鉄道局監修：解説 鉄道に関する技術基準（車両編）第四版，2022
- 5) 国土交通省：水素燃料電池鉄道車両等の安全性検証検討会とりまとめ，<https://www.mlit.go.jp/tetudo/content/001844814.pdf> (参照日：2026年2月16日)
- 6) 経済産業省：制度整備・運用見直し等の取組状況について，[https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/hoan\\_shohi/koatsu\\_gas/pdf/030\\_02\\_00.pdf](https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/hoan_shohi/koatsu_gas/pdf/030_02_00.pdf) (参照日：2026年2月16日)
- 7) 経済産業省：容器保安規則等の一部を改正する省令等について，[https://www.meti.go.jp/policy/safety\\_security/industrial\\_safety/oshirase/2025/03/20250331\\_kouatsu\\_1.html](https://www.meti.go.jp/policy/safety_security/industrial_safety/oshirase/2025/03/20250331_kouatsu_1.html) (参照日：2026年4月8日)

## VR 技術を用いた車掌の基本動作習得支援教材の開発

菊地 史倫\*

Development of VR-Based Training Materials  
for Fundamental Operational Procedures of Railway Conductors

Fumitoshi KIKUCHI

This study developed two VR (virtual reality) training materials, — from a first-person and a third-person perspectives — to support railway conductors in learning fundamental safety procedures. The two materials were created using high-resolution 360° video and tested with trainee and senior conductors. Both perspectives were rated as helpful for understanding the required procedures, and VR-based training was generally well accepted. Participants indicated complementary benefits of the two perspectives. These findings suggest that VR materials can serve as a practical tool for facilitating the acquisition of fundamental operational procedures of railway conductors.

キーワード：安全確認，仮想現実，車掌 VR システム，主観視点，第三者視点，教育訓練

## 1. はじめに

車掌は鉄道の運行に関わる様々な業務を実施している。案内放送を通じて旅客の移動を支援する他、営業運転では旅客の安全を確保するための重要な役割を担っている。これらの業務を安全かつ円滑に遂行するため、車掌養成の段階で各業務に関連する基礎的な知識および技能の教育訓練を受けているが、多くの技能は実際に現場で働きながら習熟していく必要がある。

鉄道事業者の研修所では、現場勤務前後の教育訓練の一環として、シミュレータや簡易なモックアップを用いた研修が行われている。これは現場での教育訓練が困難であるため、できるだけ実環境を模擬して技能を習熟させることを目的としている。しかしながら、シミュレータなどによる教育訓練の実施には時間的制約が伴い、車掌一人あたりに割ける訓練時間と反復訓練の機会が限られてしまうといった問題がある。

このような問題を解決する手段として、近年では仮想現実 (Virtual Reality: VR) 技術を活用した教育訓練手法が注目されている。仮想空間では現実環境に非常に近い環境下で実践的な教育訓練が可能である。また、VR を体験するための機材を用意する必要はあるが、訓練者に個別かつ高頻度の訓練機会を提供できる利点がある。実際に、鉄道関連の安全教育分野でも VR を用いた取り組みが報告されており、たとえば保守作業員に対する安全ルール遵守教育で VR を使用した教育メニューや、保守作業員の危険感受性を高める VR 訓練が提案されている<sup>1) 2) 3)</sup>。また、産業分野全般においても VR を活用した技能訓練が有効かつ柔軟な手法として期待されている<sup>4)</sup>。VR は従来の訓練手法と比較して没入的な体験が強くなるため、学習対象となる状況を体験的に理解できる点が特徴である。このような特徴から VR による学習では課題への注意や状況判断の現実性が高まり、その結果として問題解決能力や創造的思考を促進することが報告されている<sup>5) 6)</sup>。そして、学習過程自体に対する興味や学習の自律性を高めることが報告されており、学習者の満足度や受容性も高くなる<sup>6) 7)</sup>。

\* 人間科学研究部 人間工学研究室

そこで、本報告では VR 技術を用いた車掌の安全確認作業に関する教育訓練システムを提案することを最終的な目的として、本作業の中でも基本動作の習得を支援する教材の開発と、現場での試用結果について報告する。

## 2. 車掌の基本動作習得支援教材

### 2.1 安全確認作業における基本動作

車掌は、列車運行において旅客の安全を確保するため、ホーム停車中に一連の安全確認作業を実施している。ホームに到着した後は開扉操作に続いて乗降中の旅客の動きを注視し、ホーム上の状況を確認した上で閉扉操作を行い、最終的な安全確認を経て列車を発車させる必要がある。これらの確認行動は限られた停車時間内に複数の作業を所定の順序で実施することが求められる点に特徴がある。また、各鉄道事業者では、これらの作業に対して標準化された動作や手順がマニュアルとして定められており、まずは基本動作を正確に遂行できる基礎技能を身につけることが重要となる。さらに、駅構造の違いや旅客流動の変化に応じて重点的に確認すべき対象を柔軟に選択するなど、状況に応じた注意配分や判断などの応用的技能が必要である。このように安全確認作業には標準化された動作としての基本動作と、実際の状況に応じて安全を確保するための応用的技能という二つの層が存在する。基盤となる基本動作を確実に習得できれば、応用的技能の教育訓練に十分な時間と労力を割くことが可能となり、実務全体の安全性向上に寄与すると考えられる。これらの観点を踏まえると、没入体験を通じた状況理解、反復学習の容易さ、再現性の高い訓練条件といった VR の特性は、標準化された動作を短期間で正確に身につける上で有効に機能する可能性がある。

### 2.2 視点の異なる VR 教材の開発と試用

VR の特性を活かした車掌の基本動作の習得を支援するための方法の一つは、熟練車掌が安全確認作業を行っている場面を主観視点で提示することである。主観視点の映像は、使用者が自分自身の視点で現場状況を体験することで、動作の意味づけや注意配分を自然に理解できる利点がある。実際に、組み立て作業を対象とした研究では、一人称視点の教材は手続き的課題の学習を促進することが示されている<sup>8)</sup>。また、3D 動作を主観視点で提示した教材がドラム演奏の学習を支援した報告もあり、熟練者の視線や動きの特徴を学習者が模倣しやすいことが確認されている<sup>9)</sup>。これらの知見は、主観視点による VR 体験が、実務に近い臨場感を伴った動作理解を促進することを示している。

一方で、通常の訓練で行われるような第三者視点の映像提示にも教育的価値がある。第三者視点では動作全体の流れや身体の配置を俯瞰的に把握しやすく、複数のサブ動作で構成される手続き的作業の構造理解を支援する点が指摘されている。たとえば、手続きアニメーションを用いた研究では、手の視点の違いが学習成果に影響し、三人称視点の提示が全体の構造の理解を助ける場合があることが報告されている<sup>10)</sup>。したがって、主観視点と第三者視点はそれぞれ異なる種類の学習支援効果を持つと考えられる。

以上の背景を踏まえ、本報告の目的は下記の 2 点である。まず、主観視点および第三者視点の両方を備えた車掌の基本動作習得支援用の VR 教材を開発することである。次に、開発した教材を、新規養成車掌と指導車掌に試用してもらい、教材の使用感や運用上の課題について評価を行うことである。

### 2.3 開発した VR 教材の構成と特徴

本報告で開発した VR 教材は、主観視点教材と第三者視点教材の 2 種類で構成されている (図 1, 2)。

主観視点の VR 教材は、模範演技者が基本動作を実施する際の視野を基準として編集したものであり、学習者は車掌の視点に近い位置関係から動作系列を追体験できる構造を持つ。模範演技者の移動に伴う視点位置の変化が反映されるため、基本動作中の進行に応じた視線や体の動きの変化を連続的に把握しやすい。また、第三者視点の VR 教材は、模範演技者の全身動作を後方の固定視点から捉えた映像を基盤としており、学習者は動作の流れ、身体配置、動作のつながりを俯瞰的に把握できる。複数の手続き的動作から構成される基本動作の全体構造を理解する上で有用な視点である。

両教材で学習者が VR 空間内を任意に移動する機能はない。VR 空間では撮影時のカメラ位置に基づく視点が正面に固定されていたが、頭を動かすことで視点のみ変更可能である。主観視点教材では学習者が模範演技者と同じ視点になるように頭を動かすことが学習時に求められる操作であり、第三者視点教材では動作を覚えるために模範演技を観察することが学習時に求められる。両教材の再生時間はともに約 4 分 18 秒である。教材に含まれる音声は模範演技者が実施する動作音および指差確認時の発声のみであり、解説音声などの付加的情報は含まれていない。



図 1 主観視点の VR 映像例



図 2 第三者視点の VR 映像例

## 2.4 学習対象とした車掌の基本動作

鉄道事業者の協力を得て提供された車掌の安全確認作業に関するマニュアルに基づき、列車が駅ホームに到着してから発車し、次駅に到着するまでの一連の基本動作を教材の対象とした。対象動作には、開扉操作、その後の旅客の乗降状況の監視、ホーム上の状況確認、閉扉操作、および出発前の最終安全確認、発車後の状態監視や案内放送などを含んでいる。

## 2.5 撮影環境および模範演技者

VR 教材に用いる映像の撮影は、鉄道事業者の研修所に設置されているシミュレータで実施した。同事業者で車掌教育や指導を担当する講師がマニュアルに準拠した正確な基本動作を再現した模範演技を実施した。主観視点映像と第三者視点映像の動作を比較可能にするため、両視点の撮影では同一の動作系列をほぼ同じタイミングで実施するよう指示し、主要な動作とその実施時間は視点間でほぼ一致していた。

## 2.6 VR 映像の撮影および編集方法

映像の撮影には、8K 解像度の 360 度カメラ (QooCam 8K, Kandao 社製) を使用した。主観視点映像は、模範演技者の頭部にカメラを固定し、演技中の視野をそのまま収録した映像を編集して作成した。第三者

視点映像は、模範演技者全体の動作が一画面で把握できる画角にカメラを固定して撮影した映像を用いた。撮影および編集作業は、専門の映像制作会社に委託して実施した。主観視点映像は模範演技者の移動に伴って視点が移動しており、複数名で試行した結果 VR 酔いが発生した。VR 酔いを軽減するために、編集段階で視点の回転成分を除去した。これにより、体験者の視点の変化を抑制しつつ、能動的に頭を動かすことで動作理解に必要な視覚情報を保持できる構成とした。

## 2.7 VR 教材の再生環境

VR 体験用のヘッドマウントディスプレイ (HMD) は、VIVE Pro Eye (HTC 社製) を採用した。本 HMD は高精度の頭部位置や姿勢トラッキングと視線計測機能を備えており、学習者の視線方向を自然に反映した映像提示が可能であった。教材映像の再生および操作制御には、VR 学習支援ソフトウェア (Mcframe MOTION VR-learning, ビジネスエンジニアリング社製) を用いて、PC 接続環境において 360 度映像を再生した。

## 3. 基本動作習得支援教材の試用

視点の異なる車掌の基本動作習得支援教材の使用感や運用上の課題について評価を行うため、鉄道事業者の協力を得て新規養成車掌と指導車掌が試用した。なお、新規養成車掌は営業線で車掌業務を行う前に研修所で研修を受けている車掌であり、指導車掌は現場で新規養成車掌や若手車掌を指導する立場にある車掌である。

### 3.1 方法

#### 3.1.1 参加者

鉄道事業者の研修所で研修を受けていた新規養成車掌 116 人 (男性 83 人・女性 31 人・無回答 2 人)、指導車掌 25 人 (男性 18 人・女性 3 人・無回答 4 人) が参加した。新規養成車掌は平均年齢 21.8 歳 ( $SD=0.7$ )、平均車掌経験年数 0.0 年 ( $SD=0.0$ ) であり、指導車掌は平均年齢 28.0 歳 ( $SD=4.0$ )、平均車掌経験年数 3.6 年 ( $SD=2.4$ ) であった。新規養成車掌は営業線で車掌業務を行う前であったため、経験年数は 0 年とした。

#### 3.1.2 実験手順

参加者は研修の一環として VR 教材を体験した。実験者は、参加者に基本動作を学習するための 2 つの異なる視点の教材を体験してもらうことを教示し、HMD を用いて主観視点と第三者視点の両視点を体験させた。実験者は VR 教材には 2 つの視点 (主観視点・第三者視点) があること、両視点ともに頭を動かすとそれに伴って視野が移動することを事前に参加者に説明した。実験者によって参加者の体験の順番は主観視点を体験した後に第三者視点を体験する場合と、第三者視点を体験した後に主観視点を体験する場合にランダムに割り当てられた。実験者は、両視点体験後に VR 教材に関する質問紙に参加者が回答するように依頼した。

#### 3.1.3 評価項目

新規養成車掌は自分が基本動作を学習する立場を想定した直接評価を行った。指導車掌は基本動作を既に習得しているため、自身の立場で評価することが困難であった。そこで、指導車掌は現場で指導する車掌が本教材を用いて学習した場合を想定した間接評価を実施した。評価項目は下記の通りである。

- ・項目 1: VR 教材を用いた時の基本動作の主観的な覚えやすさ (1: 非常に覚えにくい~6: かなり覚えや

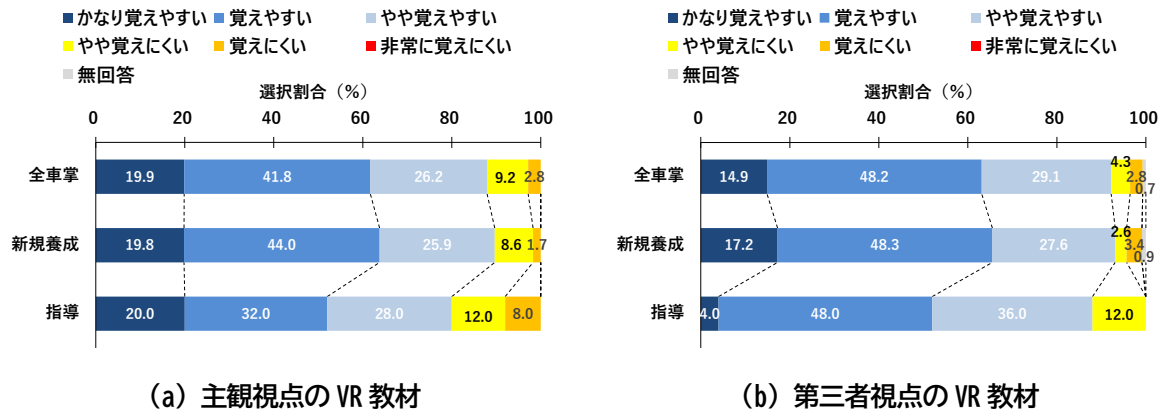
すい、から択一式で選択)。

- ・項目 2：今後の研修で使用したい VR 教材（主観視点のみ使用したい・第三者視点のみ使用したい・両視点から選択して使用したい・どちらでもよい、から択一式で選択）。
- ・項目 3：今後の研修で使用したい VR 教材の選択理由（自由記述）。

### 3.2 結果

#### 3.2.1 VR 教材を使用したときの基本動作の覚えやすさ

VR 教材および車掌経験別の主観的な覚えやすさの評価結果を図 3 に示す。各教材について、やや覚えやすい・覚えやすい・かなり覚えやすいを選択した合算値を肯定的評価とした。その結果、主観視点の VR 教材について全車掌で 87.9%（新規養成車掌：89.7%，指導車掌：80.0%）が肯定的に評価していた。また、第三者視点の VR 教材については全車掌で 92.2%（新規養成車掌：93.1%，指導車掌：88.0%）であった。新規養成車掌よりも指導車掌で主観視点では 9.7 ポイント，第三者視点では 5.1 ポイント肯定的評価が低かったが， $\chi^2$  検定では統計的に有意な差は見られなかった。



(a) 主観視点の VR 教材

(b) 第三者視点の VR 教材

図 3 車掌経験別の主観的な覚えやすさ

注) 全車掌 141 人 (新規養成車掌 116 人, 指導 25 人)

#### 3.2.2 今後の研修で使用したい VR 教材

車掌経験別の今後の研修で使用したい VR 教材の選択結果を図 4 に示す。全車掌では両視点から教材を

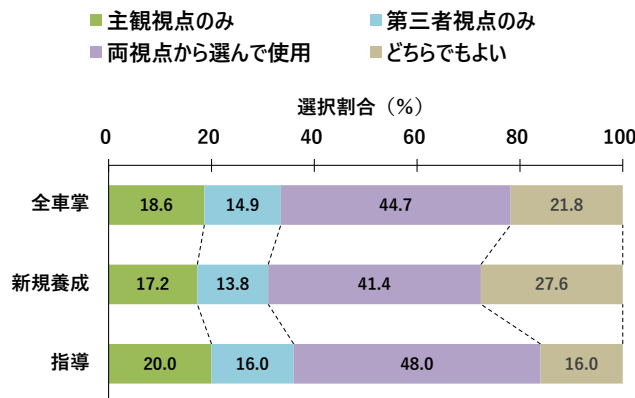


図 4 車掌経験別の今後の研修で使用したい教材

注) 全車掌 141 人 (新規養成車掌 116 人, 指導 25 人)

選んで使用する、の選択割合が最も高く 44.7%（新規養成車掌：41.4%，指導車掌：48.0%），続いて教材のどちらでもよいが 21.8%（新規養成車掌：27.6%，指導車掌：16.0%），主観視点のみは 18.6%（新規養成車掌：17.2%，指導車掌：20.0%），第三者視点のみは 14.9%（新規養成車掌：13.8%，指導車掌：16.0%）であった。新規養成車掌と指導車掌の選択率に 2.8～9.6 ポイントの違いが見られたが、 $\chi^2$ 検定では統計的に有意な差は見られなかった。

### 3.2.3 今後の研修で使いたい VR 教材を選択した理由

3.2.2 項で示した「今後の研修で使いたい教材」の選択理由について、自由記述の内容を基に分類を行った（表 1）。「両視点から選んで使用する」を選択した全車掌のうち 74.1%が各視点の利点を記述していた。具体的には主観視点の教材は車掌シミュレータを用いて訓練するような視点で体験できることや、第三者視点は基本動作全体の流れを学習しやすいといった理由が挙げられていた。また、15.5%が学習段階での使い分けが効果的と考えていた。具体的には、基本動作をしっかりと覚えていない学習初期は第三者視点が有効であり、基本動作をある程度覚えた後は主観視点が有効であるといった理由が挙げられていた。

「どちらでもよい」を選択した車掌も「両視点から選んで使用する」を選択した車掌と同様に、各視点での利点（85.7%）と学習段階での使い分け（3.3%）を挙げている人が多かった。また、主観視点と第三者視点のみ使用を選択した車掌はそれぞれの利点と欠点のみを挙げている人が多かった。

表 1 今後使いたい教材に関する自由記述の分類と出現割合および人数

今後使いたい教材	理由の分類	出現割合（人数）
両視点から選んで使用する (63人)	各視点の利点	74.1%(47人)
	学習段階での使い分け	15.5%(10人)
	その他	10.3%(6人)
どちらでもよい (31人)	各視点の利点	85.7%(26人)
	学習段階での使い分け	3.3%(1人)
	その他	13.3%(4人)
主観的視点のみ使用する (26人)	主観視点の利点	69.6%(18人)
	第三者視点の欠点	17.4%(5人)
	その他	13.0%(3人)
第三者視点のみ使用する (21人)	第三者視点の利点	54.5%(11人)
	主観的視点の欠点	36.4%(8人)
	その他	9.1%(2人)

### 3.3 考察

鉄道事業者の研修所で視点の異なる VR 教材を試用した結果、視点に関わらず基本動作が覚えやすくなると肯定的に評価されていた（主観視点：約 88%，第三者視点：約 92%）。本報告では、新規養成車掌は自分が使用した場合の直接評価、指導車掌は現場で指導している車掌が使用した場合の間接評価であり、統計的に有意な差は見られなかったが、主観視点では約 10 ポイント（指導車掌：約 80%，新規養成車掌：約 90%），第三者視点では約 5 ポイント（指導車掌：約 88%，新規養成車掌：約 93%）肯定的評価の割合が低下していた。第三者視点に比べて VR の特性を活かした主観視点の教材は鉄道事業者の研修所ではあまり使用されない形式であるという背景から、間接評価を行っていた指導者にとって、現場で指導してい

る車掌による活用イメージが持ちにくかった可能性がある。ただし、指導車掌も全体としては覚えやすさについて肯定的に評価していたことから、事前に主観視点の教材の活用方法を十分に説明することで、実務的な導入に対して大きな抵抗感は生じにくいと考えられる。

今後の研修で使いたい教材として全車掌の約45%が「両視点から選んで使用する」、約22%が「どちらでもよい」を選択していた。これらの選択理由に関する自由記述は両者ともに「各視点の利点」と「学習段階の使い分け」で共通しており、「どちらでもよい」を選択した車掌も「両視点から選んで使用する」を選択した車掌と同様の使用方法を想定していた可能性がある。したがって、これらを選択した車掌は主観視点と第三者視点の相補的な教育的価値を持つと捉えていることが示された。約19%が「主観視点のみ」、約15%が「第三者視点のみ」を選択しており、これらの選択理由に関する自由記述では各視点の利点と欠点が挙げられていた。利点としては、主観視点は現場に近い体験的理解を促し、第三者視点は動作全体の構造の理解に有用であるといった意見が多く、先行研究<sup>8) 9) 10)</sup>で指摘されている視点ごとの利点と一致していた。また、全体の約8% (11人)ではあるが、学習段階によって視点を使い分けると有効であると考えられる車掌も存在した。具体的には、基本動作を十分に習得していない初学者には第三者視点で全体像を把握させ、習熟後には主観視点でより実践的な理解を深める学習が有効であると捉えられていた。一般的に、手続き学習では、初学者はまず作業全体の構造や動作間の関係性を理解する必要があり、この段階では動作を俯瞰的に把握できる第三者視点の有効であると考えられる。動作の大枠を把握した後は、より現場に近い主観視点で細部の動きや注意の向け方を体験できることが、実践的理解の促進につながる可能性がある。視点の違いが学習者の既有知識や経験によって変化することは、手続きを学習する研究<sup>8) 10)</sup>でも示唆されており、学習者が学習目的を意識して教材の視点を選択することが望ましいと考えられる。その一方で、現状のVR技術では触覚刺激や実物操作の再現に限界があり、複雑な現場作業を仮想環境で完全に代替することは難しい。また、教材開発には一定の人的資源や費用を要することから、VR教材は従来の教育訓練を補完する形で活用することが現実的であると考えられる。

#### 4. まとめ

本報告では車掌の基本動作の習得を促進するため、主観視点と第三者視点のVR教材を開発し、鉄道現場で試用した。その結果、鉄道現場でもVRを活用した教材が受容されることが示唆され、教材の使用により基本動作が主観的に覚えやすくなることが示された。今後はこれらの教材を用いて学習することで基本動作の習得が実際に支援されているかを確認するため、記憶や動作の定着度の観点から客観的に評価していく必要がある。

#### 文献

- 1) 村越暁子, 宮地由芽子, 松本麻美, 鑄木俊暁, 羽山和紀: 触車自己防止ルールの遵守徹底に向けた安全教育法の開発, 鉄道総研報告, Vol.34, No.1, pp.9-14, 2020
- 2) 増田貴之, 佐藤文紀, 藤道宗人, 鑄木俊暁: 鉄道保線社員のハザード知覚—その1: 測定用VR映像の作成—, 産業・組織心理学会第39回大会発表論文集, 2024
- 3) 藤道宗人, 増田貴之, 佐藤文紀, 鑄木俊暁: 鉄道保線社員のハザード知覚—その2: VR映像による測定結果—, 産業・組織心理学会第39回大会発表論文集, 2024
- 4) Radhakrishnan, U., Koumaditis, K., Chnello, F., “A systematic review of immersive virtual reality for industrial skills training,” Behaviour & Information Technology, Vol. 40, No.12, pp.1310-1339, 2021.
- 5) Yulkifli, Y., Hariyanto, D., Suprpto, N., Hakim, S. R., Mufit, F., Dhanil, M., & Novitra, F., “The Impact of Virtual Reality on Creative Thinking

- Skills and Self-Efficacy in Learning Rotational Dynamics,” *International Journal of Information and Education Technology*, Vol. 15, No.6, pp.1302-1308, 2025.
- 6) Makransky, G., & Lilleholt, L. “A structural equation modeling investigation of the emotional value of immersive virtual reality in education,” *Educational Technology Research and Development*, Vol.66, pp.1141-1164, 2018.
  - 7) Radianti, J., Majchrzak, T. A., Fromm, J., Wohlgenannt, I., “A systematic review of immersive virtual reality applications for higher education: Design elements, lessons learned, and research agenda,” *Computers & Education*, Vol. 147, p103778, 2020.
  - 8) Fiorella, L., van Gog, T., Hoogerheide, V., Mayer, R. E. “It’s all a matter of perspective: Viewing first-person video modeling examples promotes learning of an assembly task,” *Journal of Educational Psychology*, Vo.109, No.5, pp.653-665, 2017.
  - 9) 早川俊行, 長谷川大, 佐久田博司: 主観視点の3D手本動作教材提示によるドラム演奏学習支援および熟練者視線情報を利用した教材による学習効果, *知能と情報*, Vol.28, No.1, pp.511-521, 2016.
  - 10) Koning, B. B., Mok, K., Marcus, N., Ayres, P., “Investigating the role of hand perspective in learning from procedural animations,” *British Journal of Educational Psychology*, Vol.93, No.S2, pp.251-269, 2023.



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6号

2026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

©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. 6

Jun. 2026

## PAPERS

- A Continuous Measurement Method of Wheel/Rail Contact Position Using Wheel Bending Strain  
.....Y.NOGUCHI, H.NISHIKORI (1)
- Estimation of Subgrade Settlement Using Cumulative Damage Theory in High-Speed Sections of the Shinkansen  
.....K.ITO, Y.MOMOYA, T.KAGEYAMA, T.NAKAMURA, H.KAWANAKAJIMA (11)
- Verification Method for Safety of Railway Rails Against Fatigue Failure Considering Application to Curved Tracks  
.....M.HOSODA, T.DESHIMARU (22)
- Evaluation Method of Crack Propagation in Rocks Caused by Change in Weather Conditions  
.....T.HISAKAWA, T.URAKOSHI, S.KAWAMURA (33)

## RESEARCH REPORTS

- Outline of Public Notice and Interpretative Standard of Technical Standard for Fuel Cell Trains  
.....Y.YASHIMA, T.YONEYAMA, T.MIZUNO, Y.ENDO (48)
- Development of VR-Based Training Materials for Fundamental Operational Procedures of Railway Conductors  
.....F.KIKUCHI (56)

