

鉄 道 総 研 報 告

第39巻 第9号

2025年9月

論文

- 車両** PQ 輪軸測定値を用いた状態空間モデルによる車輪／レール間の接触状態の推定
..... 國行翔哉，本堂貴敏，鈴木貢，宮本岳史，中野公彦（1）
- 車両** **電気** 軸型磁気光学プローブを利用する鉄道用低周波磁界測定システムの開発および性能確認試験
..... 加藤佳仁，池畑政輝（9）
- 施設** 鉄道土構造物への流動化処理土の適用方法
..... 中島進，倉上由貴，太田啓介（17）
- 施設** 深層学習を活用した PC まくらぎのひび割れ検知手法
..... 箕浦慎太郎，渡辺勉（25）
- 施設** 巨大地震による砂地盤の定常化メカニズムの解明と有効応力解析手法の開発
..... 小野寺智哉，伊吹竜一，井澤淳，福武毅芳，桐山貴俊，馬淵倉一，児玉剛（33）
- 施設** 隣接構造物の影響を除いた橋りょう・高架橋単体の固有振動数同定法の妥当性確認
..... 和田一範，坂井公俊（43）
- 運転** 列車運転士の覚醒レベル低下防止支援システムの開発
..... 鈴木綾子，星野慧，本田真佐浩，原威史（51）

技術報告

- 施設** BIM/CIM モデルを活用した鉄道 RC ラーメン高架橋の設計手法
..... 小西亮太，渡辺健（59）

PQ 輪軸測定値を用いた状態空間モデルによる 車輪／レール間の接触状態の推定

國行 翔哉* 本堂 貴敏* 鈴木 貢**
宮本 岳史*** 中野 公彦#

Estimation of Wheel/Rail Contact Conditions Based on State Space Model Using Acquired Data
by Instrumented Wheelset

Shoya KUNIYUKI Takatoshi HONDO Mitsugi SUZUKI
Takefumi MIYAMOTO Kimihiko NAKANO

This paper describes a practical method of estimating wheel/rail contact conditions using the measurement data from an instrumented wheelset. The aim is to improve the accuracy of running safety evaluation without significantly increasing measurement costs. This method uses state-space theory and a Kalman filter-based state estimator to calculate contact conditions of a wheelset, including the angle of attack, contact positions and friction coefficients. Estimation results obtained through vehicle dynamics simulations demonstrate that the proposed approach reliably estimates contact conditions in curved track sections with radii under 600 m. The feasibility of the method was validated using running test data, which demonstrated that it provides an efficient solution for estimating contact conditions.

キーワード：走行安全性，状態推定，PQ 測定，接触状態，アタック角，カルマンフィルタ

1. はじめに

車両の乗り上がり脱線に対する走行安全性は，車輪／レール間に作用する左右方向の力である横圧 Q を上下方向の力である輪重 P で除した値である脱線係数 Q/P を用いて評価される。具体的には，Nadal の式¹⁾に基づく式 (1) に示す条件を満たす場合，乗り上がり脱線の観点で安全な走行状態であると判断される²⁾。

$$\frac{Q}{P} < K\lambda \quad (1)$$

$$\lambda = \frac{\tan\alpha_F - \mu}{1 + \mu\tan\alpha_F} \quad (2)$$

K は安全率に相当する定数である。式 (2) で定義した λ は，限界脱線係数と呼ばれる，車輪がフランジ部でレールと接触する場合における力学的臨界状態を示す。 α_F はフランジ角， μ は車輪／レール間の摩擦係数である。

輪重 P と横圧 Q の連続的な把握は，輪重・横圧測定用輪軸³⁾（以下，「PQ 輪軸」と呼ぶ。）や PQ モニタリ

ング台車⁴⁾を車両に装着することで可能となる。一般的な車両の走行試験では，PQ 輪軸を用いた輪重・横圧測定（以下，「PQ 測定」と呼ぶ。）によって P と Q を把握し，走行安全性を評価することが多い。PQ 輪軸は，図 1 に示すような，ひずみゲージを貼付してロードセル化した車輪を有する輪軸である。なお，文献 3 に示された新連続法の PQ 輪軸を使用すれば，輪重 P と横圧 Q に加えて，前後接線力 T も測定できる。

脱線係数による走行安全性の評価は，これまでに多くの実績があるものの，車輪／レール間の接触状態を勘案することで，精度向上を図れる余地がある^{5)~9)}。一方で，走行中の接触状態を低い測定負荷で把握することは容易ではなく，接触状態を考慮した走行安全性の評価は実用化が進んでいない。この観点で，測定の実施負荷をできる限り増やさずに，接触状態を把握する手法の開発が重

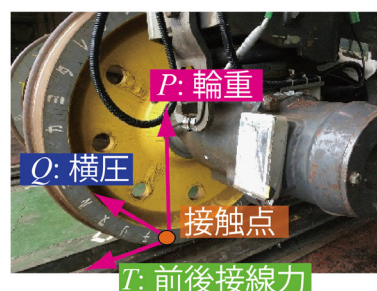


図 1 PQ 輪軸と車輪／レール間の力

* 鉄道力学研究部 車両力学研究室
** 鉄道力学研究部 車両力学研究室（現 研究開発推進部 設計・試作）
*** 明星大学
東京大学

要になる。本研究では、PQ 測定への活用を念頭に置き、新連続法³⁾による PQ 測定のデータを用いて、接触状態のうち、輪軸アタック角、接触位置および摩擦係数を状態空間論に基づき推定する手法を検討している。以降で、手法の概要ならびに車両運動シミュレーションデータ・実測データを用いた検討結果を報告する。なお、本報は、文献 10 の要部を抜粋し、論旨を変えずに一部構成を変更したものである。詳細については文献 10 を参照されたい。

2. 推定手法の概要

2.1 状態空間論による推定

本研究では、接触状態の把握を逆問題と捉え、状態空間論を用いて状態推定器を構成し、接触状態を推定する手法を提案する。状態空間論は、列ベクトルである状態変数 x 、入力 u および観測量 y で構成される、式 (3) と式 (4) に示す二つの数学モデル（プラントモデル）を用いる理論である。

$$x(k) = f(x(k-1), u(k-1)) \quad (3)$$

$$y(k) = h(x(k), u(k)) \quad (4)$$

$f()$ は x に関する時間移行を示す予測モデル、 $h()$ は x と y の因果関係を表わす観測モデルであり、 k は離散時間系におけるタイムステップを意味する。

本研究では、状態推定器の構成に、プラントモデルのノイズを考慮できるカルマンフィルタを用いた。カルマンフィルタは、式 (3) と式 (4) を用いて x の推定値 $\hat{x}$ を式 (5) により計算する予測器を与えるものである。

$$\hat{x}(k) = \hat{x}^-(k) + G(k) \{y(k) - \hat{y}^-(k)\} \quad (5)$$

$\hat{x}^-$ と $\hat{y}^-$ は式 (3) と式 (4) を元にそれぞれ得られる事前推定値、 G はカルマンゲインであり、式 (3) と式 (4) のモデルの尤もらしさを推定し、機械的に計算される。図 2 にカルマンフィルタのブロック線図を示す。

2.2 プラントモデルの概要

図 3 に示すような、速度 xV_w で軌道を走行する PQ 輪軸の運動モデルを考える。PQ 輪軸の重心に輪軸座標系 $O_w-x_wy_wz_w$ を、左右の車輪の接触点位置に輪軸座標系と同じ向きに車輪接触点座標系 $O_i-x_iy_iz_i$ (i : 進行方向右側を $i=1$, 左側を $i=2$) を取る。 ψ_w と ϕ_w は輪軸アタック角と輪軸ロール角である。 θ_i は ψ_w の発生に伴って車輪の接触点が最下点から前後に移動する量を角度で表わした接触位相¹¹⁾ である。 μ_i は車輪／レール間の摩擦係数、

ρ は軌道の線路形状を表わす曲線の曲率、 $2b$ は接触点間距離である。図 3 にて青文字で表わしたものは測定量・既知量に関するものであり、赤文字は推定量である。 μ_i は、一般に左右の車輪／レール間で異なる場合があるが、本研究では手法の基礎的な検討にあたって、まずは左右で値が等しいと仮定し、 $\mu_i = \mu$ とする。車輪に関する座標を図 4 に示す。左右方向について、車輪のバック面から 65mm の位置に原点を取り、接触位置を s_i で表わす。また、接触角と車輪の回転半径を α_i と r_i で表わす。

2.2.1 予測モデルで使用する微分方程式

接触点において以下の関係を考え、状態量に関する微分方程式を導出する新たな力学モデルを提案した。

・関係 1: クリープ力とクリープ率の関係

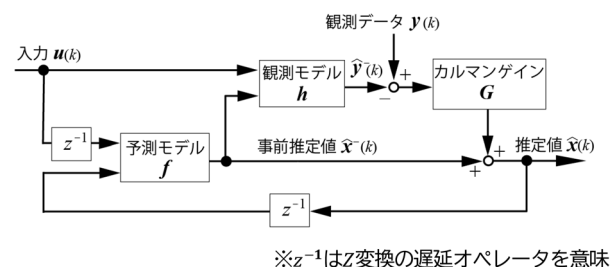


図 2 カルマンフィルタのブロック線図

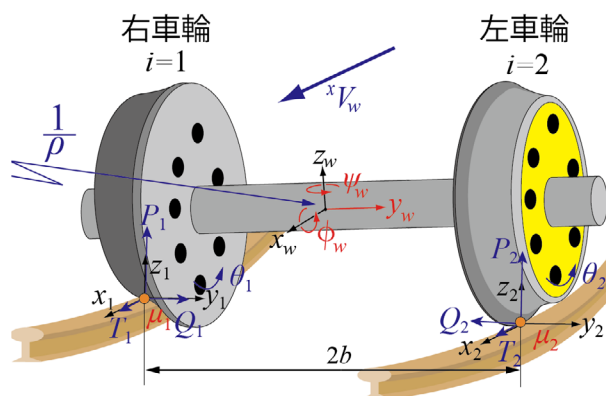


図 3 PQ 輪軸と座標

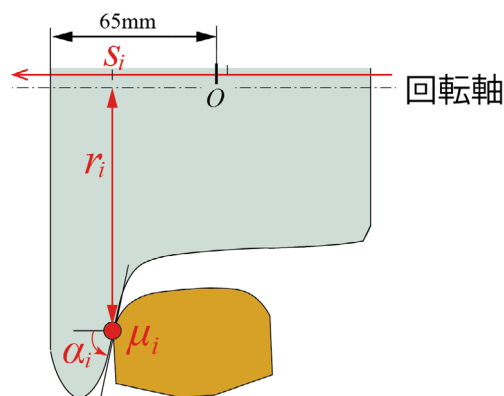


図 4 車輪と座標

- ・関係2：クリープ率と運動変数の関係
- ・関係3：PQ測定で得られる3分力と接触力の関係

関係1について、車輪がレール上を走行する場合、車輪／レール間のすべり（クリープ）によって、接触領域では、図5に示す力とモーメントが発生する。その中で、前後・左右方向の力である縦クリープ力 ${}^x F_i$ と横クリープ力 ${}^y F_i$ は、すべりの度合い（クリープ率） v_i によって変化する。その合力の特性は、図6に示すようなものになる¹²⁾。文献13で言及されている、走行試験での摩擦係数の変化を考慮し、Kalker理論¹²⁾とLevi-Chartet則¹⁴⁾を用いて、この関係を v_i 、 μ および法線力 N_i の関数として式(6)の形式でモデル化する。

$$[{}^x F_i, {}^y F_i]^T = F_i(v_i, \mu, N_i) \quad (6)$$

関係2について、クリープ率 v_i は、車輪／レール間の接触に関する変数（輪軸左右変位 y_w 、輪軸アタック角 ψ_w 、輪軸ロール角 ϕ_w 、車輪の回転半径 r_i および接触角 α_i ）と走行速度 ${}^x V_w$ ならびに曲率 ρ で表わせる。接触幾何を考え、さらに輪軸左右速度 $\dot{y}_w$ と接触速度 $\dot{s}_i$ の局所的な比例関係（係数を a_i （時変）とすれば、 $\dot{y}_w = a_i \dot{s}_i$ を満たす）を仮定すれば、接触に関する変数の一部を従属変数にでき、 v_i は式(7)の形式で書ける。

$$v_i = v_i(x_i, \dot{x}_i, \rho, {}^x V_w) \quad (7)$$

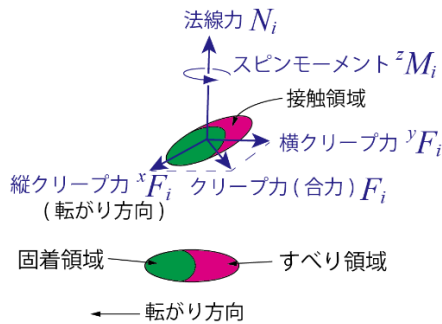


図5 接触面とクリープ力

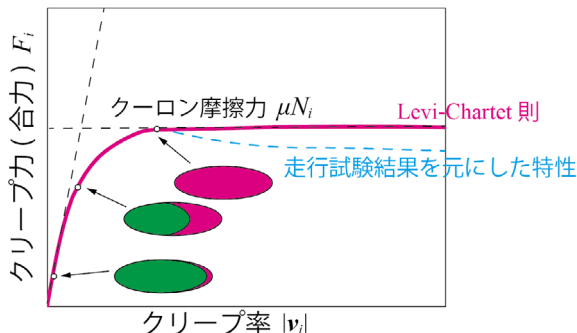


図6 クリープ力とクリープ率の関係

ここで $x_i = [\psi_w, s_i, a_i]^T \in \mathbb{R}^3$ である。

関係3について、クリープ力と法線力は、PQ輪軸の測定値である前後接線力 T_i 、横圧 Q_i および輪重 P_i を用いて、式(8)の形式で表わせる。

$$[{}^x F_i, {}^y F_i, N_i]^T = T(\alpha_i, \psi_w, \phi_w, T_i, Q_i, P_i) \quad (8)$$

$T()$ は、角度 $[\alpha_i, \psi_w, \phi_w]^T \in \mathbb{R}^3$ に関する $[T_i, Q_i, P_i]^T$ の回転変換後の力を表わす関数である。

式(6)～式(8)より、各車輪に対して、式(9)に示す微分方程式が得られる。

$$\dot{x}_i = v_i^{-1}(F_i^{-1}(T(x_i, T_i, Q_i, P_i), \mu), x_i, \rho, {}^x V_w) \quad (9)$$

一般に予測モデルは、運動方程式から導出することが多いが、代わりに式(9)を用いることで、台車枠との相互作用の影響を考慮することなく、1軸分のPQ輪軸の測定データのみで接触状態を推定できる。

式(9)に加え、推定時刻 t の前後で μ と a_i が一定、すなわち式(10)に示す仮定を与え、予測モデルを得る。

$$\exists \Delta t > 0, \forall \tau \in (t - \Delta t, t + \Delta t),$$

$$\frac{d}{d\tau} \begin{bmatrix} \mu(\tau) \\ a_i(\tau) \end{bmatrix} = 0 \quad (10)$$

2.2.2 観測量

PQ輪軸で得られる測定量を観測モデルに使用する。測定する3分力 $[T_i, Q_i, P_i]^T \in \mathbb{R}^3$ と接触状態の因果関係は、車輪ごとに独立した2次元の方程式で表現できる。本研究では、方程式を前後接線力 T_i と横圧 Q_i について解いた式(11)を観測モデルに使用する。

$$[T_i, Q_i]^T = T^{-1}(\alpha_i, \psi_w, \phi_w, N_i, P_i) \quad (11)$$

また、接触位相 θ_i の差 $\Delta\theta = \theta_2 - \theta_1$ をPQ輪軸で得られる信号から算出する手法が提案されている¹¹⁾ことを考慮し、本研究では $\Delta\theta$ も観測量として用いる。 $\Delta\theta$ は、他の接触状態を用いて式(12)で近似される。

$$\Delta\theta \approx \psi_w(\tan\alpha_1 - \tan\alpha_2) \quad (12)$$

2.3 状態推定システム

提案した車輪／レール間の接触状態の推定システムを図7に示す。測定データは、一つのPQ輪軸を対象に前後接線力 T_i 、横圧 Q_i 、輪重 P_i 、接触位相差 $\Delta\theta$ および走行速度 ${}^x V_w$ を用いる。下付き添え字 i は車輪番号を意味する（ $i=1$ ：右車輪、 $i=2$ ：左車輪）。モデルパラメータには、Kalker理論¹²⁾におけるクリープ係数 κ_{11} 、 κ_{22} 、

κ_{23} , Levi-chartet 則¹⁴⁾ の飽和パラメータ β , 中立状態での車輪の回転半径 r_0 と左右車輪の接触点間距離 $2b$ および車輪形状データ $r=r(s)$ を使用する。一方で, スラック, カントおよびレール形状についての情報は不要である。プラントモデルの非線形性を考慮し, フィルタリング処理は, Unscented Kalman Filter¹⁵⁾ に基づき行ない, 推定パラメータは, プラントモデルのシステムノイズ $\mathbf{v}$ と観測ノイズ $\mathbf{w}$ についての分散共分散行列 $\mathbf{V}$ と $\mathbf{W}$, Unscented Kalman Filter での重みパラメータ κ_{KF} , 観測モデルのスケールパラメータ P_0 を設定する。線路形状データには, 線路台帳を参照し, 曲線の曲率 ρ を使用する。状態変数 $\mathbf{x}$ は, $\mathbf{x} = [\dot{\psi}_w, \psi_w, \dot{y}_w, s_1, s_2, a_1, a_2, \mu]^T \in \mathbb{R}^8$ である。観測量 $\mathbf{y}$ は, $\mathbf{y} = 1/P_0 [T_1, T_2, Q_1, Q_2, P_0 \Delta\theta]^T \in \mathbb{R}^5$ である。入力 $\mathbf{u}$ は, $\mathbf{u} = [P_1, P_2, \rho, {}^x V_w]^T \in \mathbb{R}^4$ である。推定する車輪／レール間の接触状態を表わす変数は, 輪軸アタック角 ψ_w , 接触位置 s_i , 摩擦係数 μ である。

3. 車両運動シミュレーションを用いた推定性能の検証

本研究では, まず, 様々な曲線・走行条件を容易に設

定でき, 実験での測定が困難な情報を容易に得られる車両運動シミュレーションを用いて検討を行なった。使用したシミュレーションソフトウェアは, Dassault Systèmes 社の Simpack (ver.2021.5) である。

3.1 シミュレーション条件

3.1.1 車両モデル

モデルは一般的な狭軌在来線を想定し, 車体, 台車枠および輪軸が剛体である 1 車両モデルとした。

車両は, 図 8 に示すように, 車体 1 個, 台車枠 2 個, 輪軸 4 個 (図中青文字で示す) についてそれぞれ 6 自由度を有する剛体とし, 各剛体はばね・減衰要素 (図中赤文字で示す) で結合されたモデルとした。車輪の断面形状は修正円弧路面の設計形状とした。

3.1.2 軌道モデル

軌道の線路形状は図 9 に示すように, 直線, 入口緩和曲線, 円曲線, 出口緩和曲線および直線の 5 つの区間を含む左の単曲線として設定した。円曲線の曲線半径は, シミュレーションごとに変化させる。今回の検討では, 円曲線中のカントとスラックの値は固定し, カントは 0mm, スラックは 0mm とした。円曲線の半径 R は 100m

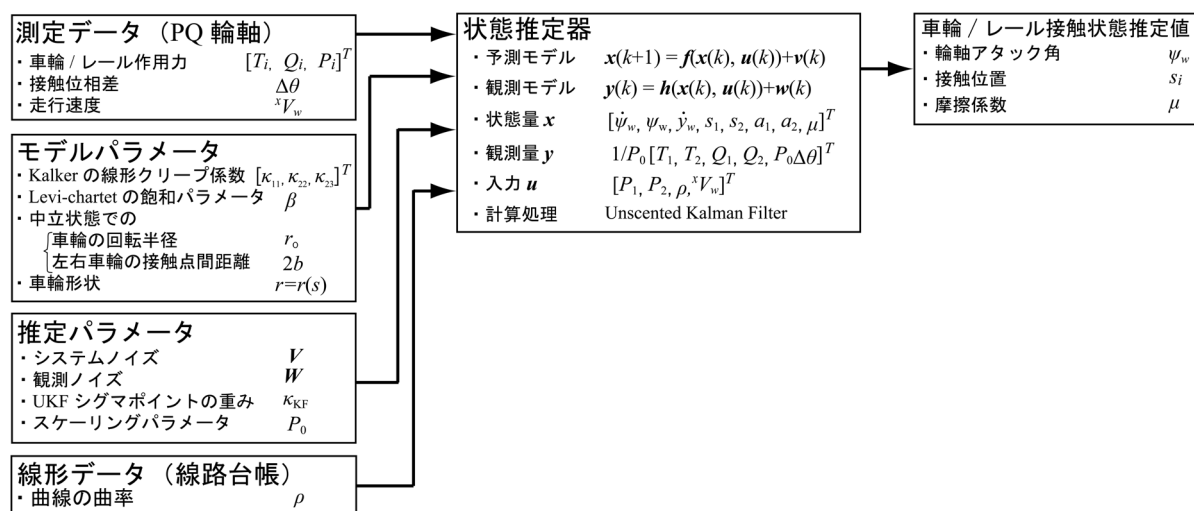


図 7 本研究で提案する車輪／レール間の接触状態の推定システム

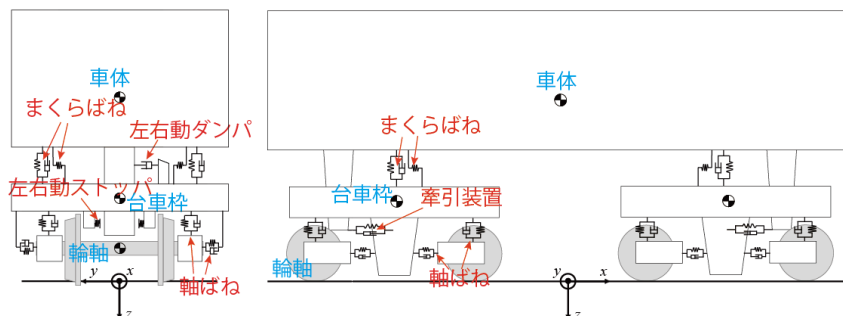


図 8 本研究で提案する車輪／レール間の接触状態の推定システム

～1000mの間で、刻み100mで変化させた。図10に示すように、緩和曲線区間の軌道の曲率は、緩和曲線開始位置からの走行位置に比例して変化する。それぞれの区間長さは100mで固定した。各区間の境界には、3m(両区間1.5mずつ)のスムージング形状を設定する。レールの断面形状は、JIS 50kgNレールの設計形状とし、タイプレートにより1/40だけ軌間内側に傾いている。車輪／レール間の摩擦係数は、試行するシミュレーションごとに变化させ、変動の範囲を0.05～0.70、刻みを0.05とし、左右の車輪／レール間で同じ値にした。クリープ力の計算には、FASTSIM¹⁶⁾を用いた。

3.2 シミュレーション結果

3.2.1 推定結果の例

例として、 $R=100\text{m}$ 、 $\mu=0.4$ における推定結果を図11に示し、それぞれの結果を以下に述べる。

・摩擦係数(図11(a)):

緩和曲線を含む大部分の曲線区間では、推定値とシミュレーション設定値が平均的に近い値となった。一方で、直線区間、ならびに直線と緩和曲線の接続部では、推定値がほぼ0になっており、適切に推定できなかった。これは、直線区間では、車輪／レール間にすべりがほとんど発生せず、クリープ力の決定に摩擦係数がほとんど関与しないことが理由であると考えられる。輪軸が曲線区間に入り、車輪／レール間にすべりが生じると、クリープ力が発生する。すべりが大きく

なると、プラントモデル内でクリープ力の計算に摩擦係数が大きく影響を与えることになり、平均的に適切な推定値が得られたと考える。

・輪軸アタック角(図11(b)):

緩和曲線を含む大部分の曲線区間において、推定値はシミュレーション値に近い値となった。一方で、直線と緩和曲線の接続部では、推定値が急激に変化しており、適切に推定できなかった。接続部ですべり率に変化することが原因で、摩擦係数の推定値が急激に変化し、カルマンフィルタで計算する推定システム内の分散共分散行列やカルマンゲインが変化した影響を受けた可能性があると考えられる。

・外軌側接触位置(図11(c)):

走行安全性を考える上で重要となる外軌側の接触位置を示した。接触位置が正に増加する場合、接触点が車輪フランジ側に移動していることを意味する。上記2つの結果と同様に、曲線区間の大部分で推定値はシミュレーション値とよく合っていた。一方で直線区間では、両方で大きな差があった。これは、曲線区間においては、接触位置に対して接触角と車輪の回転半径の感度が大きく変化することが理由であると考えられる。曲線区間では、車輪の接触点がフランジ部の近くでレールと接触し、接触位置に対する接触角と車輪の回転半径の感度が良くなる。このため、接触位置の推定誤差が観測量推定値の誤差に大きく影響を与えることになり、カルマンゲインによる修正が適切になされる。

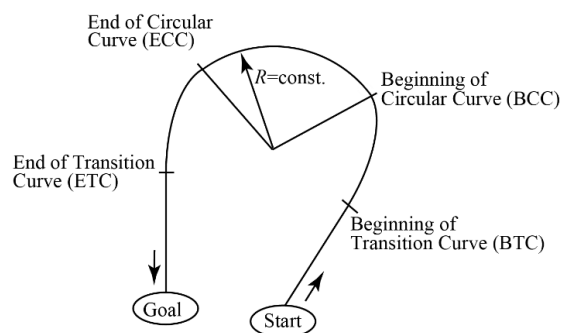


図9 軌道の線路形状

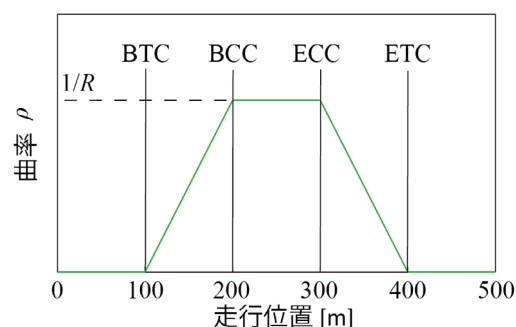


図10 軌道の曲率

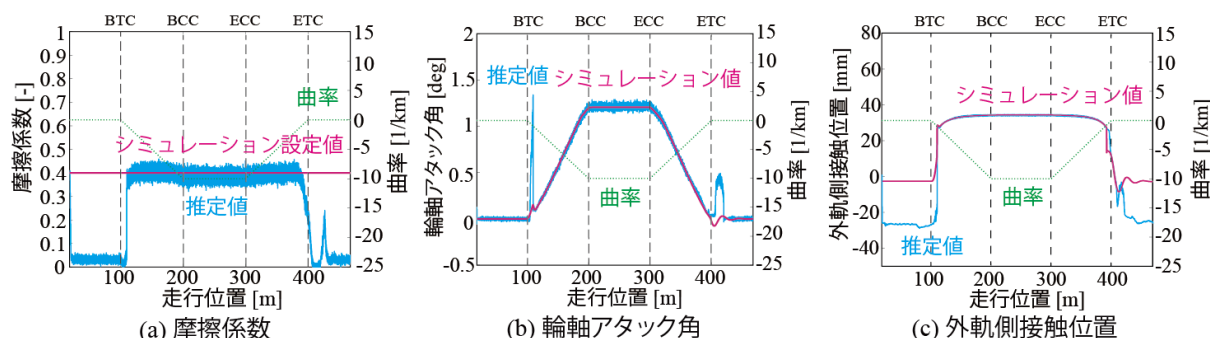


図11 推定結果の例：円曲線の半径が100m、車輪／レール間の摩擦係数が0.4の場合

一方で、直線区間では、車輪路面領域でレールと接触するため、この感度が悪くなり、推定精度が低下したと考える。

3.2.2 すべての推定結果の総括

良好な結果が得られた円曲線区間において、提案手法を適用可能な範囲を調べた結果を図12に示す。図12は、横軸にシミュレーションでの摩擦係数の設定値、縦軸に曲線半径を取り、円曲線区間における摩擦係数と輪軸アタック角のシミュレーション値と推定値の差の平均をコンター図で表示したものである。図12において、赤色に近い領域では、推定値が真値を過少に見積もり、青色に近い領域では過大に見積もっていることを表わし、色が濃い場合は、真値と推定値の差が大きく、薄い場合は差が小さいことを表わす。

図12より、曲線半径が600m以下の場合、設定した摩擦係数の値によらず、摩擦係数の推定値の誤差は0.1以下、輪軸アタック角の推定値の誤差は0.06deg以下となり、良好な推定結果が得られた。一方で曲線半径が600mよりも大きくなると、一部摩擦係数の設定値が低い場合を除いて、真値と推定値の差が大きくなり、推定精度が悪化した。通過する曲線半径が大きい場合、発生する輪軸アタック角が小さくなり、車輪／レール間のすべりも小さくなることを考えると、提案手法は、クリープ力が摩擦力に飽和している場合や飽和しかけているほど、良好な推定結果が得られるといえる。

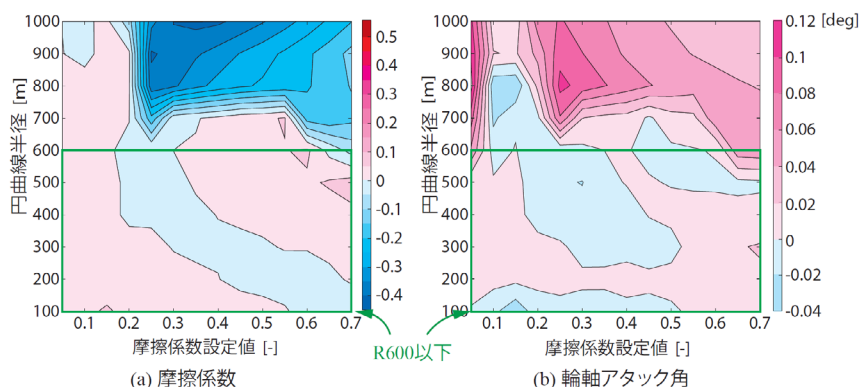


図12 円曲線区間における推定値の誤差

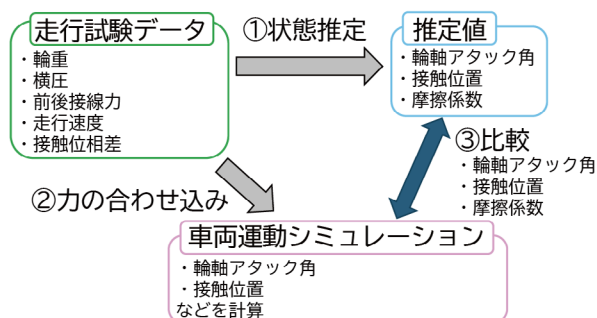


図13 本検証の実施イメージ

4. 実測データを用いた妥当性検証

過去に鉄道総合技術研究所内で実施した走行試験データを用いて、提案手法の妥当性を検証した。今回データを使用する走行試験では、推定対象の接触状態を測定しておらず、測定値と推定値の直接的な比較ができない。そこで、走行試験データに合わせ込んだ車両運動シミュレーションを実施し、得られた計算結果と推定結果を比較した。検証方法の概要を図13に示す。

走行試験データから得られる輪重、横圧、前後接線力、走行速度および接触位相差の情報より、提案手法による状態推定が可能であり、輪軸アタック角、接触位置および摩擦係数の推定値が得られる（図13の①）。比較対象を得るため、条件を合わせ込んだ車両運動シミュレーションを実施する（図13の②）。シミュレーション内の摩擦係数の設定値を変化させ、PQ輪軸で得られる3分力の測定値をできる限り再現するようにして合わせ込みをした。使用したシミュレーションソフトウェアは、前節と同じである。以上によって得られた2つの結果より、推定結果の妥当性を検討した（図13の③）。

4.1 試験の概要

鉄道総合技術研究所にある試験線で通勤車相当の試験車両を走行させて得られた測定データを用いた。図14に示すように、試験車両は牽引車に牽引されて走行する。

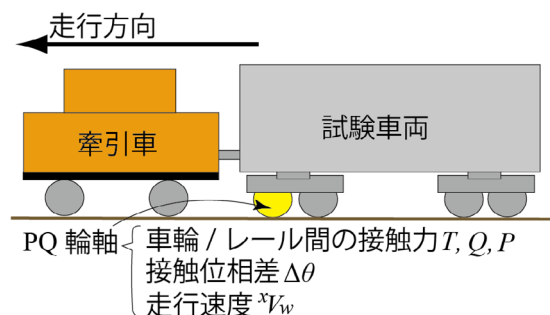


図14 試験車両と測定量

試験車両の先頭軸には、PQ 輪軸が装着されており、推定に必要な信号を取得する（サンプリング時間：1ms）。試験曲線は、図 15 に示す曲線半径 R 、カント C およびスラック S を設計値とする 4 つの円曲線 $C_1 \sim C_4$ を有する左向きの曲線である。本研究では、この曲線を目標速度 20km/h で走行させて得られた測定値を検証に使用した。

4.2 推定結果

測定データを用いて状態推定を試行した。ここでは、推定値の局所的な整合性は評価せず、平均的に妥当な応答が得られているかを検討するため、提案手法の円曲線区間への適用結果を対象に評価を実施した。その際、観測量である接触位相差 $\Delta\theta$ は、推定結果に大きな影響を及ぼすため¹⁷⁾、 $\Delta\theta$ の測定値 $^M\Delta\theta$ とシミュレーション値 $^S\Delta\theta$ の差が大きい場合は、評価に適さない条件となる。そこで、4 つの円曲線区間において、 $^M\Delta\theta$ と $^S\Delta\theta$ の平均値を比較した。その結果を図 16 に示す。図 16 より、曲線 C_1 と C_4 では、 $^M\Delta\theta$ と $^S\Delta\theta$ の差が大きく、曲線 C_2 と曲線 C_3 では、差が小さかった。そこで以降では、曲線 C_2 と C_3 の結果に着目する。なお、測定値とシミュレーション値が異なるのは、レールの摩耗を考慮せず、設計形状のレール断面データを用いてシミュレーションをしたことが原因の一つにあると考える。

推定結果を図 17 に示し、それぞれの結果を以下に記す。

・摩擦係数（図 17 (a)）：

推定値 $\hat{\mu}$ シミュレーション設定値 $^S\mu$ を示している。測定された接触力を再現するために決定した $^S\mu$ は、

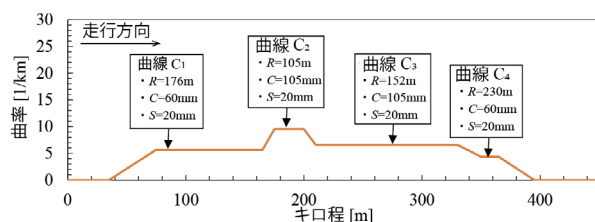


図 15 試験曲線の軌道の線路形状

$^S\mu=0.55$ と高い値になった。これは、今回の走行試験のデータが、乾燥した日に同じ区間を数分おきに走行させたときのものを使用したことが原因であると考えられる。この $^S\mu$ に対して、 $\hat{\mu}$ は近い値になっており、提案手法により平均的に妥当な摩擦係数を推定できたと考える。

・輪軸アタック角（図 17 (b)）：

推定値 $\hat{\psi}_w$ とシミュレーション設定値 $^S\psi_w$ を示している。 $\hat{\psi}_w$ は $^S\psi_w$ に対して、誤差が大きい場合でもその値は 0.06deg 程度になっており、提案手法により平均的に妥当な輪軸アタック角が推定できたと考える。

・外軌側の接触位置（図 17 (c)）：

推定値 $\hat{s}_o$ とシミュレーション設定値 Ss_o を示している。 $\hat{s}_o$ と Ss_o は、曲線 C_2 の場合に 2mm の誤差があるものの、両者は近い値であり、提案手法により平均的に妥当な接触位置が推定できたと考える。

以上より、実測データに対しても、提案手法により妥当な推定結果が得られることを示せたといえる。

5. まとめ

本報では、乗り上がり脱線に対する走行安全性の精度向上に資するため、状態空間論に基づき、走行安全性を評価するために実施する現行の走行試験の測定負荷をできる限り増やさずに、車輪／レール間の接触状態を推定する手法を提案するとともに、その妥当性について検討

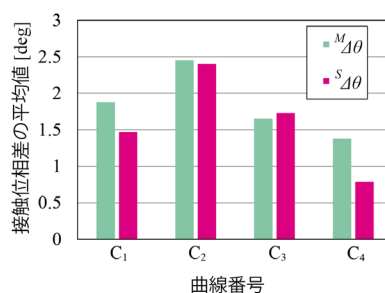


図 16 接触位相差の比較結果

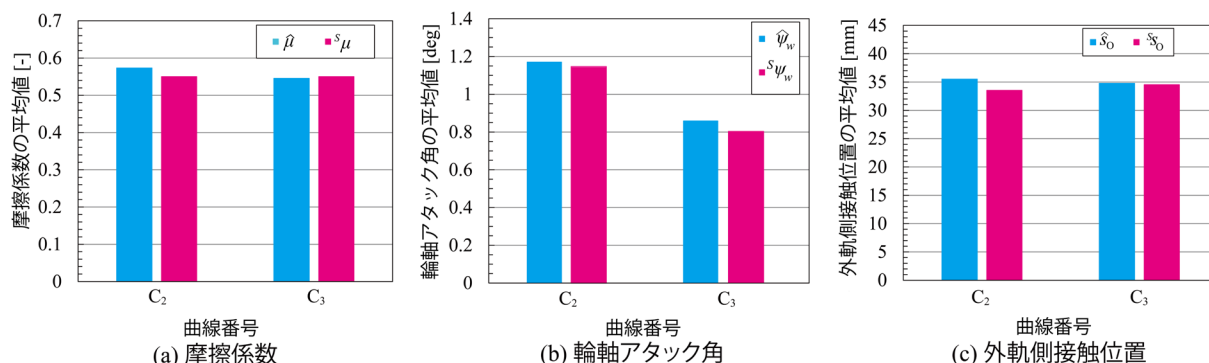


図 17 推定結果とシミュレーション計算値の比較

した。検討結果は以下の通りである。

- ・車両運動シミュレーションを用いて、提案手法の妥当性を検証した。その結果、今回想定した車両においては、曲線半径が600m以下の曲線区間に対して、良好な推定結果を得た。一方で、直線を含む曲線半径が大きな曲線では、妥当な推定結果が得られなかった。これは、曲線半径が大きいすなわちすべりが生じにくい走行状態では、クリープ力の決定に摩擦係数がほとんど影響しないことが原因であると考ええる。

- ・実測データを用いて提案手法による妥当性を検証した。その結果、検証に用いた車両および軌道条件においては概ね妥当な推定結果が得られることが分かった。

以上より、走行安全性評価で重要となる急曲線に対して、現行の輪重・横圧測定の測定負荷を増やさず、輪重・横圧測定で入手可能な情報のみから、車輪／レール間の接触状態を把握できる手法を構築できたと考える。

今後は、下記の事柄に対する検討を進め、提案手法の深度化を進めていきたい。

- ・内外軌の摩擦係数を個別に推定した場合や摩擦係数が変動した場合の推定性能
- ・動的な応答の観点での推定性能
- ・今回の検討で想定した車両と軌道条件以外での推定性能

文 献

- 1) J. Nadal: "Locomotives á Vapeur, Collection Encyclopédie Scientifique," Bibliothèque de Mécanique Appliquée et Génie, pp.185-197, 1908.
- 2) 鉄道総合技術研究所編：在来鉄道運転速度向上試験マニュアル・解説，鉄道総合技術研究所，pp.78-84，1993
- 3) 石田弘明，松尾雅樹，手塚和彦他：鉄道車両の新しい輪重，横圧，脱線係数連続測定法：測定装置の開発，日本機械学会論文集 C 編，Vol.63，No.614，pp.3417-3423，1997
- 4) A. Matsumoto, Y. Sato, T. Ohno, et al.: "A new measuring method of wheel-rail contact forces and related considerations," Wear, Vol.265, No.9-10, pp.1518-1525, 2008.
- 5) J. Elkins and H. Wu: "New criteria for flange climb derailment," Proceedings of the 2000 ASME/IEEE Joint Railroad Conference, pp.1-7, 2000.
- 6) A. Matsumoto, Y. Michitsuji, Y. Ichiyanagi, et al.: "Safety measures against flange-climb derailment in sharp curve-considering friction coefficient between wheel and rail-," Wear, Vol.432-433, pp.1-10, 2019.
- 7) R.S. Barbosa: "A 3D contact force safety criterion for flange climb derailment of a railway wheel," Vehicle System Dynamics, Vol.42, No.5, pp.289-300, 2004.
- 8) H. Weinstock: "Wheel climb derailment criteria for evaluation of rail vehicle safety," Proceedings of the ASME Winter Annual Meeting, Paper. 84-WA/RT-1, 1984.
- 9) 中橋順一，三宮大輝，福村将彦：車輪上昇量を勘案した乗り上がり脱線評価手法，鉄道総研報告，Vol.33，No.3，pp.5-10，2019
- 10) 國行翔哉，本堂貴敏，鈴木貢ほか：PQ 輪軸を装着した鉄道車両における単一車輪クリープ力モデルによる輪軸の運動状態と車輪／レール間の摩擦係数の推定法，日本機械学会論文集，Vol.90，No.933，2024
- 11) T. Hondo and Y. Noguchi: "Measurement method for longitudinal displacement of wheel/rail contact point using strain gauges put on wheels," Mechanical Engineering Journal, Vol.7, No.3, 2020.
- 12) 日本機械学会編：鉄道車両のダイナミクスとモデリング，丸善出版，pp.33-43，2017
- 13) 山本大輔：走行実験と二円筒試験装置を用いた室内実験における車輪／レール接線力特性の差異に関する一考察，日本機械学会論文集，Vol.90，No.936，2024
- 14) 日本機械学会編：鉄道車両のダイナミクス，電気車研究会，pp.27-29，1994
- 15) E.A. Wan and R.V.D. Merwe: "The unscented Kalman filter for nonlinear estimation," Proceedings of the IEEE 2000 Adaptive Systems for Signal Processing, Communications, and Control Symposium, pp.153-158, 2000.
- 16) J.J. Kalker: "Three-Dimensional Elastic Bodies in Rolling Contact," Kluwer Academic Publishers, pp.117-119, 1990.
- 17) S. Kuniyuki, T. Hondo, M. Suzuki, et al.: "Improvement of estimation accuracy for wheelset angle of attack using a single-wheel creep-force model by taking into account contact phase difference and lateral contact position," Proceedings of the Fifth International Conference on Railway Technology: Research, Development and Maintenance, Paper. 31.22, 2022.

3 軸型磁気光学プローブを利用する 鉄道用低周波磁界測定システムの開発および性能確認試験

加藤 佳仁* 池畑 政輝**

Development of a Tri-axial Magneto-optical Probe for Measuring Magnetic Fields in the Low-frequency Bands

Yoshihito KATO Masateru IKEHATA

When measuring low-frequency magnetic fields related to rolling stock, multiple sensors are needed. Therefore, we developed a system that uses a tri-axial magneto-optical probe to measure magnetic fields. This probe is capable of wideband measurement, which enables measurement with a single device. A mechanism was constructed by incorporating optical elements, etc. to detect magnetic fields in a direction 90 degrees that is different from that of conventional single-axial magneto-optical probes. These were then combined to create a tri-axial probe. We confirmed through performance verification tests that using a low noise laser in the low-frequency band as the light source significantly improves the noise characteristics below 100 Hz.

キーワード：磁気光学プローブ，ファラデー効果，低周波磁界，環境磁界，磁界測定

1. はじめに

鉄道環境において使用される電子・電気機器から発生する磁界の測定法に関しては，国際規格 IEC 62597¹⁾ が 2019 年に発行されている。国内では，IEC 62597:2019 を基にした日本産業規格 JIS E 0201²⁾ が 2024 年 3 月に発行された。IEC 62597 では，直流～20kHz までの周波数域に対する測定法を定めており，鉄道車両において従来から考慮されていた直流磁界だけでなく，交流磁界の測定および評価方法についても規定している。

このような情勢を受け，鉄道環境における低周波磁界の測定を効率化するため，磁気光学プローブを利用する磁界測定システムを開発した。本報告では，開発した磁気光学プローブの原理と構成を述べた後，性能確認試験の結果を報告する。

2. 従来の磁界測定と先行研究における課題

国内外での測定に関する規格の制定もあり，低周波数帯の磁界を適切に測定する必要性が高まっているが，磁界を測定するためのセンサには多種多様なものがある。それぞれ，測定可能な周波数帯や強度範囲が異なり，その測定の目的に応じて使い分けることとなるが，前述した規格の測定対象周波数帯を鉄道車両で想定し得る強度範囲も含めて 1 種類のセンサですべてカバーすることは難しい。従来，交流磁界はサーチコイル型センサ，直

流磁界は別の方式のセンサを用いて測定するといったように，複数のセンサを用いて測定を行うのが一般的である³⁾。また，直流磁界から交流磁界まで測定可能なフラックスゲート方式のセンサも開発されているが，その測定最大強度は数 mT であり，これを超える磁界の測定には別のセンサが必要となる。このように，鉄道車両に関する従来の低周波磁界の測定においては，複数種の測定用センサを用いる必要があり，測定効率の課題がある。

そこで，この課題を解決するために，先行研究において，前述したセンサよりも対応可能な周波数帯域と強度範囲が広い磁気光学センサを活用した 1 軸型の磁界測定システムを試作し，基本的な性能を確認した⁴⁾。

鉄道車両のように複数の磁界の発生源がある環境で実際に使用する場合，磁界が最大となる方向を見定めて，1 軸のプローブで磁界を測定するのは効率が悪い。さらに，鉄道車両に関する磁界は，発生源の動作や周辺環境の条件によって大きさと向きが時々刻々と変化し得るため，このような磁界を 1 軸のプローブで測定するのは困難である。そのため，本研究では，実用性を高めるために，プローブを大型化することなく 3 軸に対応させることを目指した。

また，前述の 1 軸型プローブを利用する磁界測定システムでは，システム自身から生じるノイズの影響により，測定最低磁束密度が 10μT に留まっていた。前述の国際規格 IEC 62597 では測定センサが満たす最低磁束密度を基準値の 5% としている。ここでの基準値とは IEC 62597 が参照している環境磁界の国際的なガイドラインである ICNIRP ガイドライン⁵⁾ が示す値となり，最も低い磁束密度の参考レベルは 3kHz-20kHz の 27μT である。

* 浮上式鉄道技術研究部 電磁気研究室

** 人間科学研究部 快適性工学研究室

この5%値は1.35 μ Tとなり、当国際規格の要求を満たすためには、この値まで測定できることが要求される。そこで、3軸型の磁気光学プローブによる測定システムの開発にあたっては、ノイズを低減することにより、この要求を満たすことを目指した。直流から20kHzの周波数帯において、直流磁界は1 μ ~5mT、交流磁界は1 μ ~300 μ Tの強度範囲で測定できることを目標とした。

3. 3軸型磁気光学プローブ

3.1 磁気光学プローブの測定原理

磁気光学プローブはファラデー効果^{6) 7) 8)}を利用する測定用プローブである。ファラデー効果は、ファラデー素子（またはファラデー回転子）と呼ばれる物質に直線偏光を入射した時に、光の進行方向に平行な方向成分の磁界により、偏光面が回転する現象である（図1）。この偏光面の回転角をファラデー回転角と呼ぶ。ファラデー回転角 θ_F [rad]は物質固有の係数であるヴェルデ定数 V [rad/(T $\cdot$ m)]、ファラデー素子に印加する磁束密度 $\vec{B}$ [T]、光軸方向に平行な法線ベクトル $\vec{n}$ 、ファラデー素子の厚さ ℓ [m]により式(1)で表される。

$$\theta_F = V(\vec{B} \cdot \vec{n})\ell \quad (1)$$

この偏光面の回転角によって磁界の変動を検出するのが、磁気光学プローブを利用した測定システムの基本的な仕組みである。

3.2 磁気光学プローブの3軸化

開発した磁気光学プローブの構成を図2に示す。外部より入力された光はプローブの筐体内の光ファイバケーブル内を伝搬して、偏光子を透過することで直線偏光となる。直線偏光は光サーキュレータを経由してファラデー素子へ入射し、光の伝搬方向と同じ方向成分の磁束密度の大きさに比例した角度だけ偏光面が回転する。光サーキュレータに戻った光はさらに検光子を透過し、ここで偏光面の回転の度合いが光量の変化の度合いとし

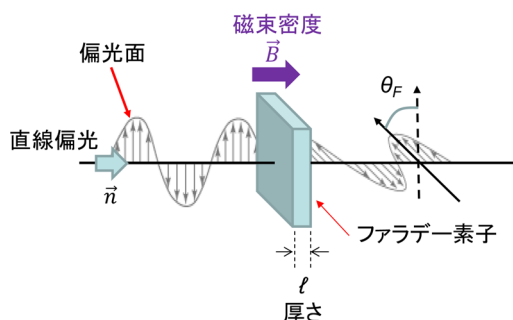


図1 ファラデー効果

て検出される。これをフォトディテクタで光電変換して、電気信号として外部へ出力する。各光学素子間の伝送には光ファイバケーブルを用いているが、これらが曲げや振動等の影響を受けることにより、出力が変動することを確認しているため⁴⁾、この筐体内で曲げ等が起こらないように物理的に固定している。

既開発の1軸型プローブでは、偏光子、検光子、光サーキュレータを筐体内に納め、それらを結ぶ光ファイバケーブルを筐体内で曲げが起こらないように固定する構成をとっている。今回開発したプローブでは、小型のフォトディテクタを選定し、これも筐体内に納めることにより、検光子とフォトディテクタを結ぶ光ファイバケーブルを他のケーブルと同様に固定している。これにより、当該光ファイバケーブルが受ける振動等の影響による出力の変動を抑制する効果が期待できる。以上が3軸プローブにおける1軸分の構成であり、これらを3軸分組み合わせてプローブ本体を構成する。

3軸を成すためには、直交する3方向を測定できるように、ファラデー素子を配置する必要があるが、当プローブはフィールドの様々な場所で使用することを考えると、光をファラデー素子に入射する機構をできるだけ小さいサイズで実現する必要がある。

図3(a)に光路方向（プローブの長手方向）の磁界を検出する構造を示す。プローブの先端部には、サイズが0.3mm×0.3mm×0.3mmのファラデー素子である磁気光学結晶（ビスマス置換型磁性ガーネット結晶⁹⁾）が取り付けられており、その端面には反射膜がコーティングされている。入射光が磁気光学結晶を通過することにより偏波面が回転するが、光は反射膜により入射方向に戻り、プローブ外部で処理されることになる。

これと90度異なる方向の磁界を検出する軸の構造を

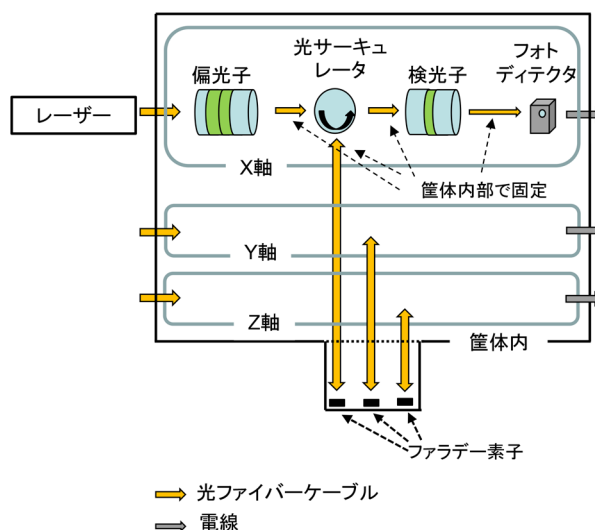


図2 開発した磁気光学プローブの構成

図3 (b) に示す。磁気光学結晶の近傍に直角プリズムを取り付けており、これによって伝搬された光の方向が90度変わり、元々の光路方向に対する垂直方向の磁界を検出することが可能となる。

図3 (a) に示す構造で1軸分を構成し、図3 (b) に示す構造を90度異なる向きに取り付けることにより2軸分を構成して、3軸型の磁気光学プローブを実現した。そして、各3軸を近接させて同一のケースに収めることにより、コンパクトな構成とした。プローブのセンシング部の構成を図4に、全景を図5に、主な諸元を表1に示す。筐体部には3軸分の偏光子、光サーキュレータ、検光子およびフォトディテクタが格納されている。また、筐体部の端部にはそれぞれの入力用光ファイバーケーブルと出力用のSMA端子が3個ずつ設置されている。

3.3 レーザー光源に起因するノイズの低減策

磁気光学プローブに光を供給する光源としては半導体レーザーを用いている。従来の1軸型測定システムでは一般的に通信で使われている波長可変型の偏光レーザーを光源として使用していた。しかし、この波長を可変する機構からは、主に100Hz以下の極低周波帯のノイズ

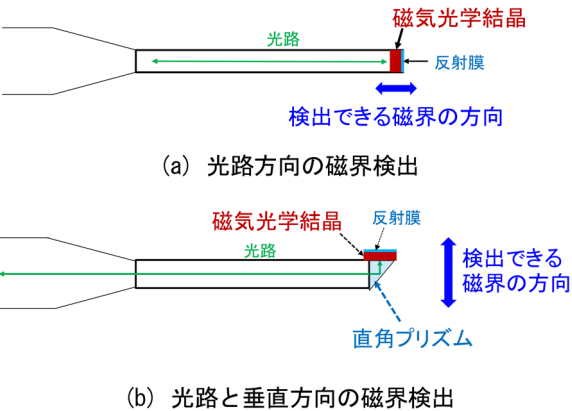


図3 3軸化した磁気光学プローブの磁界検出

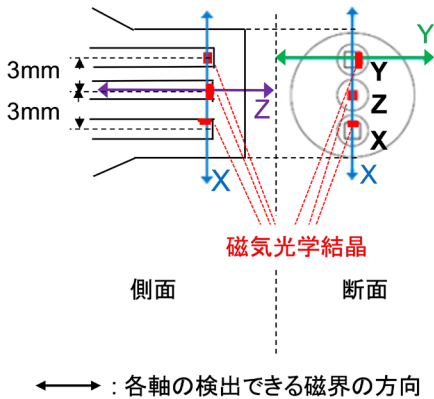


図4 センシング部の構造

が発せられていることを確認した。図6 (a) にレーザーの出力波形を示す。このノイズは100Hz以下の測定感度に影響を及ぼすため、レーザー出力におけるノイズを低減する必要があった。

1軸型のプローブでの性能評価試験時には、出力の安定性を確認するために、レーザーの波長もパラメータとして試験を行ってきたが、波長による大きな差異はみられないことから、光学部品の選択肢が多い1550nmとしたため、この1550nmでの波長固定型レーザーを光源として使用することを検討した。図6 (b) に今回採用した波長固定型レーザーの出力波形を示す。このような確認試験により、主に100Hz以下の周波数帯でノイズ強度が約1/10程度まで低減されることを確認した。

これらの結果を受け、この波長固定型の無偏光レーザーを当3軸型磁界測定システムの光源として使用することとした。当レーザーと3軸型磁気光学プローブから成る低周波磁界測定システムを図7に示す。

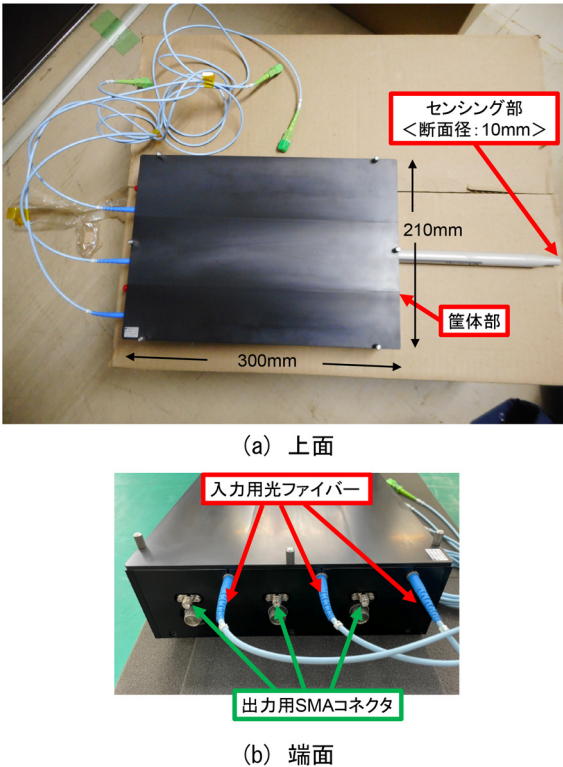


図5 3軸型磁気光学プローブ

表1 3軸型磁気光学プローブの主な諸元

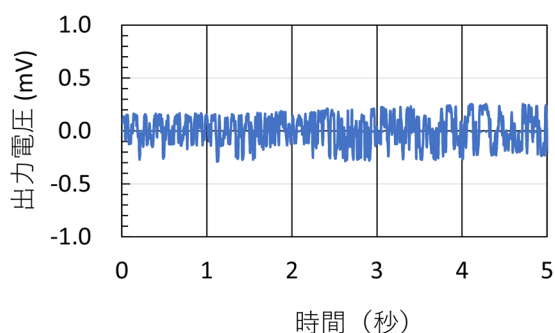
外形寸法	全長 500mm (センサーヘッド部：200mm) 筐体部：300(W)×210(D)×65(H)mm
重量	2.0kg以下
筐体部材質	ABS樹脂 (プラスチック素材)

4. 確認試験

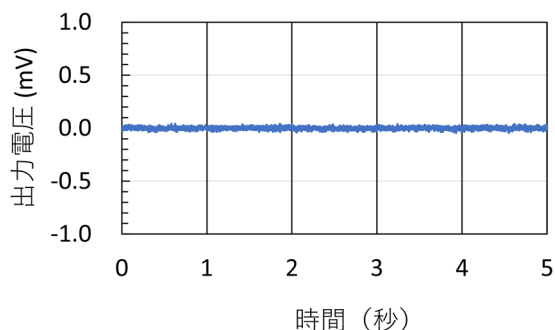
4.1 時間応答性確認試験

製作した3軸型磁気光学プローブの時間軸に対する応答性を確認する試験を行った。前述したレーザーを光源とした測定系により、磁界発生用のメリットコイル¹⁰⁾(図8)から発生する磁界を測定する試験を実施した。

低周波磁界として、電力周波数であり車上電源の周波数としても使われる50Hzの正弦波磁界の測定試験を行った。メリットコイルから正弦波磁界を発生させ、その時の磁気光学プローブの各軸の出力をそれぞれ測定した。各軸における50Hz、100 μ Tの正弦波磁界の出力電



(a) 波長可変型レーザー



(b) 波長固定型レーザー

図6 測定システムの光源となるレーザー出力の比較
(波長 $\lambda=1550$ nm)

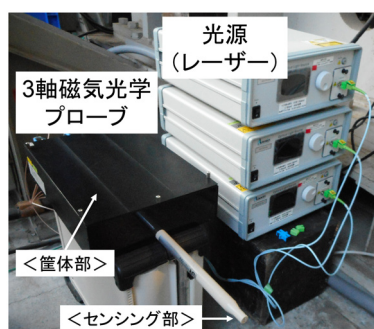


図7 磁気光学プローブによる3軸磁界測定システム

圧波形を図9に示す。ここでは出力の中心点を0Vとしている。メリットコイルに流通した電流波形をあわせて示している。この測定結果より、各軸とも印加磁界に応じた正弦波の電圧波形が出力されており、時間軸に対する応答性を確認できた。

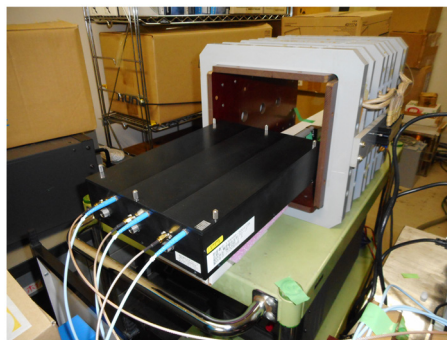
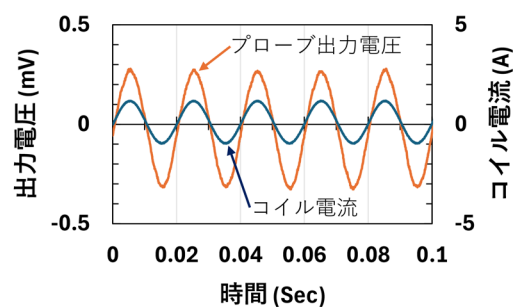
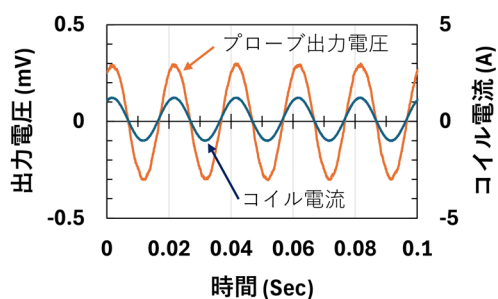


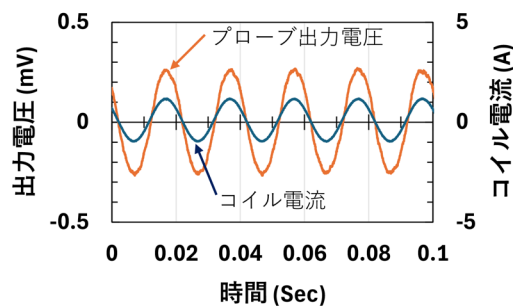
図8 磁界発生用メリットコイルによる測定試験



(a) X 軸



(b) Y 軸



(c) Z 軸

図9 各軸の時系列出力波形 (50Hz 100 μ T)

4.2 ノイズ特性確認試験

開発した3軸磁界測定システムのノイズ特性を確認した。メリットコイルからの磁界を当システムで測定し、1軸型プローブによる測定システムの結果と比較した。メリットコイルから発生する周波数50Hz、強度4 μ Tの正弦波磁界を測定した時の3軸の周波数解析結果を図10に示す。1軸型の測定システムと比べて、3軸のいずれも、およそ100Hz以下の周波数帯におけるノイズが周波数によっては1/10以下まで低減されており、最低感度レベルである測定対象の信号に対して、ノイズが十分に低減されていることを確認した。

4.3 直線性確認試験

測定システムとしての直線性を確認するために、複数の周波数において、磁界発生コイルからの印加磁束密度を変化させながら、磁気光学プローブからの出力を確認する測定試験を実施した。図11に、直流、50Hz、20kHzの磁界を印加した時の磁気光学プローブのX軸からの出力を示す。印加磁束密度は直流が1 μ ~5mT、50Hzと20kHzが1 μ ~300 μ Tとした。直流磁界の発生はヘルムホルツコイルを用いた。これらの結果より、それぞれの直線性は、いずれも最大偏差が5%以内であることを確認した。Y軸、Z軸も同様であった。

前節のノイズ低減と本節の出力直線性を併せて、20kHzまでの周波数において従来の1軸型プローブによる測定システムでは測定できなかった1 μ Tから、IC-NIRPガイドラインの参考レベルを超える磁束密度まで、国際規格IEC 62597が示す20%以内の精度で測定できることを確認した。

4.4 直流磁界に対する計測限界の確認試験

直流磁界を0から5mTまで変化させ、磁気光学プローブによる測定試験を行った。Z軸での測定結果を図12(a)に示す。既存のフラックスゲート式センサで測定した結果を図12(b)に示す。フラックスゲート式セン

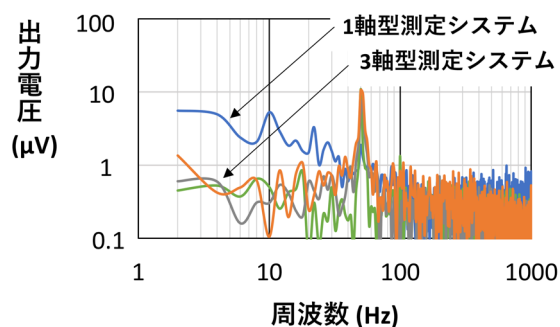
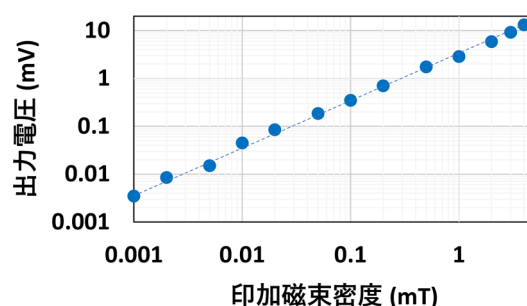


図10 正弦波磁界（50Hz）の測定結果
（1軸型測定システムとの比較）

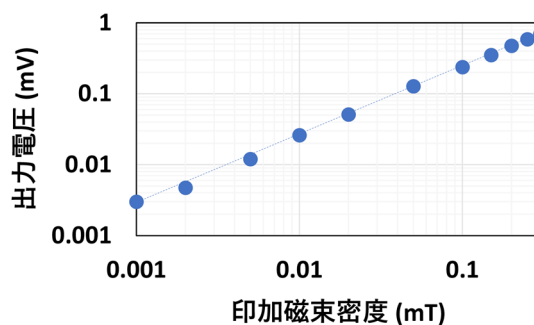
サでの測定では1mTを超えたところでオーバーレンジによりそれ以上の磁界を測定することができないが、磁気光学プローブでは5mTまでの直流磁界を連続して測定できることを確認した。

4.5 鉄道車両から発生する磁界を模擬した測定試験

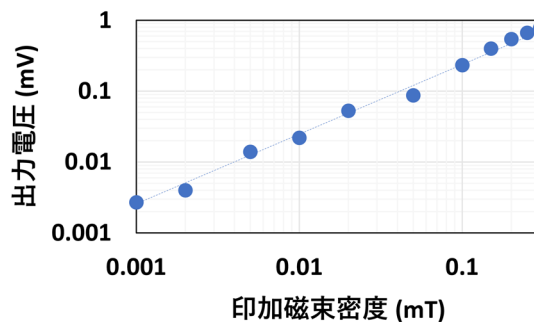
交流磁界測定の確認試験として、鉄道総研内実験棟に設置されている、車両駆動用リニアインダクションモータ試験装置（以下、LIM試験装置）周辺から発生する磁界の測定を実施した。当装置は円弧状の電機子と円筒形状のリアクションプレートから構成される試験装置であり、インバータで駆動される。LIM試験装置の外観および磁気光学プローブ配置の概略を図13に示す。



(a) 直流



(b) 50Hz



(c) 20kHz

図11 印加磁束密度と磁気光学プローブX軸からの出力電圧との関係

LIM 試験装置近傍における LIM の加速中に測定した 3 軸それぞれの測定波形を図 14 に示す。LIM に通電するインバータからのケーブルの電流波形をあわせて示しているが、時間とともに周波数が上昇する特有の波形が確認できる。磁気光学プローブの各 3 軸からもこれに応じた波形を出力することを確認した。

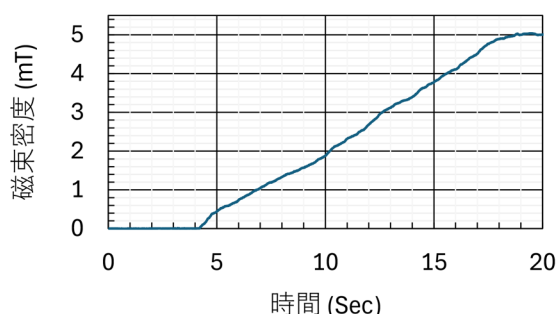
5. まとめ

鉄道車両に関する低周波磁界の測定における課題を解決するために、3 軸型の磁気光学プローブを開発し、磁界測定システムを構築した。プローブは様々な場所で使用することが考えられ、可搬性を考慮してできるだけサ

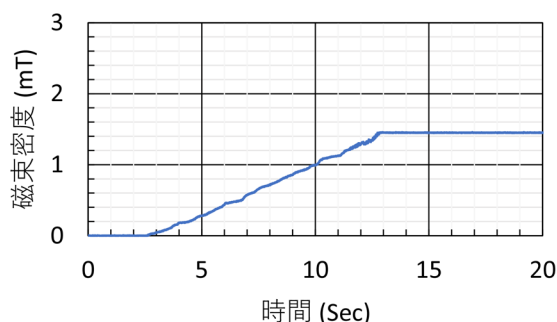
イズを小さくする必要があったため、ファラデー素子への入射光のルートを 3 軸間で近接させ、ファラデー素子の直近で直角プリズムにより 2 軸分の光のルートを 90 度変える構造とし、これにより 3 軸化を実現した。また、光ファイバケーブルの振動による出力光量の変動対策として、当該部分をプローブの筐体内で物理的に固定する変動低減策を施した。さらに光源について、従来の波長可変型レーザーは主に 100Hz 以下の周波数帯でノイズが大きいことを確認したため、波長固定型のレーザーを選定することにより、当周波数帯で大幅なノイズ低減を図った新たな磁界測定システムを構築した。

測定システムの確認試験により、従来のシステムに比べて主に 100Hz 以下の帯域でノイズ特性が大きく改善されていることを確認した。また、直流から 20kHz までの各周波数の磁界を印加する測定試験を行い、国際規格 (IEC 62597) が求める測定精度 ($\pm 20\%$ 以内) を有することを確認した。

今後は、フィールドで使用するために、取り扱い面で



(a) 磁気光学プローブによる測定



(b) フラックスゲート式センサによる測定

図 12 変動する直流磁界の測定

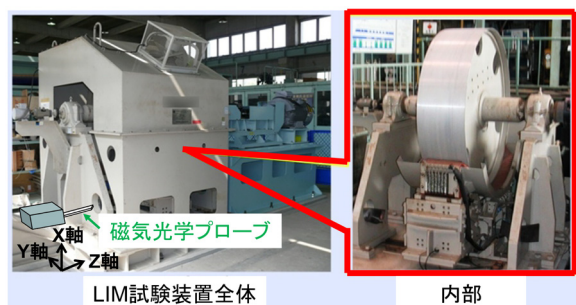
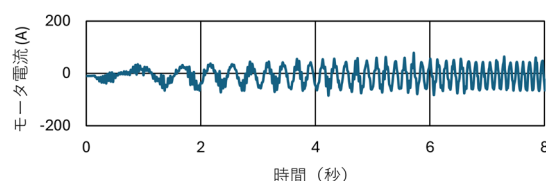
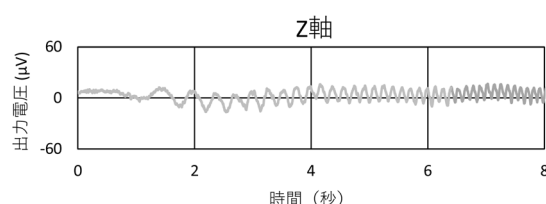
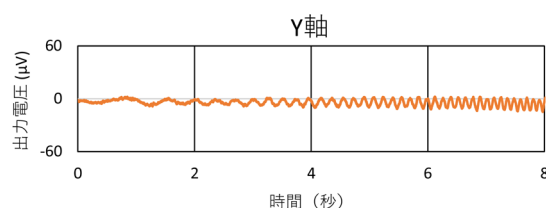
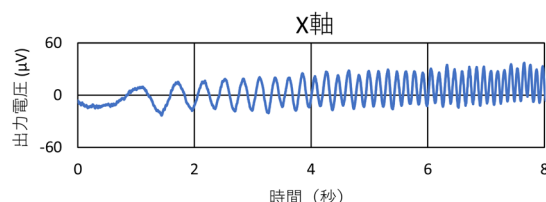


図 13 車両駆動用 LIM 試験装置近傍での測定



(a) LIM への通電電流波形



(b) 各軸の磁界波形

図 14 車両駆動用 LIM 試験装置周辺における磁界の測定波形

の整備等を行い, 実際の測定に活用していく予定である。

謝 辞

本研究における試験の実施等にあたり, 東京都立大学の鈴木敬久先生をはじめ関係の皆様には多大なご協力をいただいた。この場を借りて厚くお礼申し上げます。

文 献

- 1) IEC 62597 ed1.0, "Measurement procedures of magnetic field levels generated by electronic and electrical apparatus in the railway environment with respect to human exposure," 2019.
- 2) JIS E 0201 : 鉄道環境における人体ばく露を考慮した電子・電気機器から発生する磁界レベル測定手順, 2024
- 3) 竹内俊裕, 田代維史, 吉永純, 長谷川智紀, 水間毅: 国際規格に対応した鉄道における磁界測定例, J-RAIL2010, S3-3-1, 2010
- 4) Kato, Y., Suzuki, Y., and Wake, K., "Magneto-optical probe with integrated optical elements for measuring environmental

magnetic fields in the low- and intermediate-frequency bands", IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol.72 pp.1-8, 2023.

- 5) International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, "Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric and Magnetic Fields (1 Hz - 100 kHz), Health Physics," Vol.99, 818-836, 2010.
- 6) M. Faraday "Faraday's Diary," Vol.4, 1933.
- 7) 佐藤勝昭: 光と磁気, 朝倉書店, 2001
- 8) 西健太郎, キックアルフレード, 鈴木敬久, 和氣加奈子: ファラデー効果を用いた中間周波数帯磁界測定用の光磁界センサに関する予備的検討, 電子情報通信学会環境電磁工学研究会, 2014
- 9) S. Wittekoek, T.J.A. Popma, J.M. Robertson, and P.F. Bongers, "Magnet-optic spectra and the dielectric tensor elements of bismuth-substituted iron garnets at photon energies between 2.2-5.2 eV", Phys. Rev. B, No.12, pp.2777-2788, 1975.
- 10) R. Merritt, C. Purcell, and G. Stroink, "Uniform magnetic field produced by three, four, and five square coils," Rev. Sci. Instrum., 54(7), pp.879-882, 1983.

鉄道土構造物への流動化処理土の適用方法

中島 進* 倉上 由貴** 太田 啓介***

Application of Liquefied Stabilized Soil in Construction of Railway Earth Structures

Susumu NAKAJIMA Yuki KURAKAMI Keisuke OTA

The authors propose a specification of the Liquefied Stabilized Soil (LSS) for use in parts of earth structures affected by repeated train loads on the basis of FEM analysis. This study also clarifies the required strength and deformation characteristics of LSS for railway embankments, having conducted a series of laboratory tests and test construction. The study found that LSS can be made stable under repeated train loads if sufficient density and stress ratio are achieved. Laboratory tests and long-term monitoring of the test constructed LSS also show that constructing a protective layer above the LSS layer is highly effective in maintaining the LSS in wet conditions and reducing the vertical stress acting on its surface in accordance with the proposed specification.

キーワード：流動化処理土，一軸圧縮強度，土構造物，施工試験

1. はじめに

近年，少子高齢化や労働力の減少等により，構造物の建設コスト低減や省力化がより強く求められている。そこで，鉄道総研では鉄道土構造物の施工を急速化・省力化するために，現状の土構造物の施工条件として多くを占める狭隘箇所での施工や，災害復旧などに適用性が高い流動化処理土について，鉄道土構造物への適用性を数値解析，室内土質試験，模型実験や長期暴露試験により検証し，「鉄道構造物に用いる流動化処理土の設計施工法マニュアル」¹⁾の改訂案を作成した。本報告では，一連の検討やマニュアル改定案の概要について概説する。

2. 鉄道における流動化処理土の適用と課題

2.1 流動化処理土の概要

流動化処理土は，建設発生土や建設汚泥に泥水，固化剤等を添加して製造する流動性に優れた材料で，施工時は高流動，固化後は高強度・高剛性を発揮可能な地盤材料である。1992年に旧建設省の総合技術開発プロジェクト「建設副産物の発生抑制再生利用技術の開発」において開発され，その後マニュアル等の整備により，地下構造物の埋戻しを中心として土木・建築構造物の施工に活用されている。盛土材料としての適用を想定した場合，施工条件によっては流動性に優れ締固め不要で高強度を発現可能という利点が施工の低コスト化や省力化に寄与可能と考えられる。

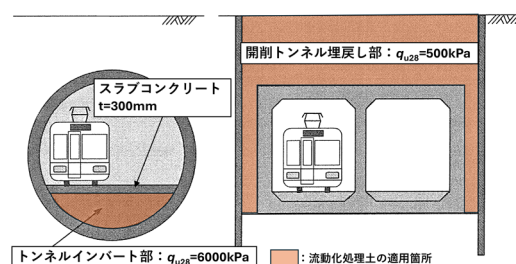


図1 鉄道における流動化処理土の適用箇所¹⁾に加筆

2.2 鉄道における流動化処理土適用の経緯

鉄道においては，1996年以降，みなとみらい線での利用のため，配合試験が実施され，トンネルインバート部用高強度処理土に関する繰返し試験や，埋戻し用低強度処理土の圧密試験，クリープ試験や密度設定に関する検討が行われ，2001年に鉄道建設公団，地下鉄事業者，鉄道総合技術研究所をメンバーとする「流動化処理土の合理的設計施工法検討会」での検討^{例えば2)}を経て，2005年に「鉄道構造物に用いる流動化処理土の設計施工法マニュアル」¹⁾が刊行された。同マニュアルにおいては，列車荷重を受ける部位として図1に示すトンネルのスラブコンクリート下のインバート部や埋戻し材料としての適用仕様が示されている。このうち，トンネルインバート部では，コンクリートの代替としての位置づけから28日養生後の一軸圧縮強度 $q_{u28}=6000\text{kPa}$ を確保することとしている。

2.3 土構造物としての適用上の課題

盛土材料の代替として鉄道土構造物への流動化処理土の適用を考えた場合，コンクリートの代替としてのトンネルインバート部での仕様と比較して，必要強度は低減

* 構造物技術研究部 基礎・土構造物研究室
** 鉄道力学研究部 計算力学研究室
*** 東急建設株式会社

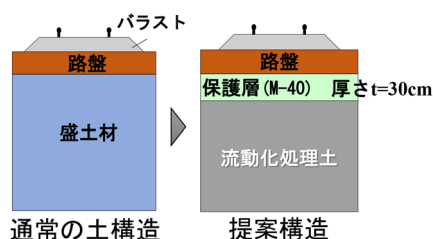


図2 提案構造の概要

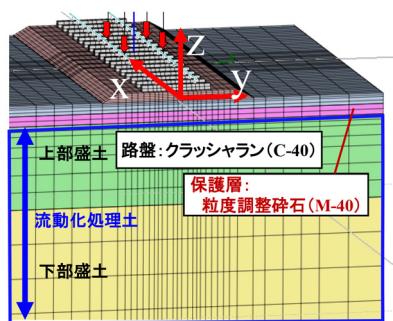


図3 FEM解析のモデル概要

表1 解析に用いた物性値

	q_{u28} (kPa)	層厚 (m)	ヤング率 (MPa)	ポアソン比
50kgNレール	—	—	210,000	0.3
PC3号まくらぎ	—	—	35,000	0.17
バラスト道床	—	0.25	100	0.3
砕石路盤(C-40)	—	0.30	120	0.3
保護層(M-40)	—	0.30	180	0.3
流動化処理土 (上部盛土)	600kPa 1200kPa	2.40	379.5 759.0	0.3
流動化処理土 (下部盛土)	600kPa 1200kPa	5.00	759.0 1518.0	

可能と考えられる。一方で、低強度化に伴い列車の繰返し荷重による変位の増加が問題となる可能性がある。また、地上部の土構造物での適用では、供用過程での乾燥や乾湿繰返しに対する強度低下も問題となる。さらに、周囲が閉塞された埋戻し部ではなく、地上部での施工に適用する場合、流出を防止する型枠が必要となるが、施工時側圧の実態も不明である。鉄道総研では、これらの課題を解決する仕様を設定するとともに、流動化処理土の特徴を活かした構造を提案したので、以下ではその概要について述べる³⁾。

3. 構造・仕様の提案

3.1 構造・仕様の検討

列車荷重の繰返し载荷に伴う累積変位の問題や、乾燥および乾湿繰返しによる強度低下の問題を解決することを目的として、図2に示すように流動化処理土の上面に粒度調整砕石 M-40 からなる厚さ 30cm の保護層を設けることを前提とし、その場合に流動化処理土に必要な

る強度について静的線形 FEM 解析により検討した。

3.2 構造・仕様の提案

既往研究では列車荷重に対する一軸圧縮強度の比（载荷応力比）を 0.2 未満にとどめることで、累積変位を供用上問題ない程度に抑制可能なが示されている⁴⁾ ため、検討対象とした強度の流動化処理土を用いた場合における流動化処理土上面での発生応力を評価し、载荷応力比について分析した。図3に解析断面を示す。

既往研究²⁾では流動化処理土の $q_{u28}=6000\text{kPa}$ 、 2000kPa に関して検討が行われ、列車荷重作用下においても変形量がトンネルインバートとしての供用に支障がない程度に小さくなることが確認されている。一方で、鉄道盛土の路床改良における安定処理土の必要強度は $q_{u28}=600\text{kPa}$ であるが、この仕様で列車荷重に対して路床部分の変形量が問題とならないことも確認されている。これに対して、流動化処理土については路床安定処理と異なり、土材料を締固めて構築するわけではなく、空隙が大きい状態でセメンテーションの効果により強度・剛性を確保する特性を有する。このため、通常の土を締固めて構築する路床安定処理土と同強度では累積変形が大きくなる恐れがある。これらを鑑み、本研究では $q_{u28}=600\text{kPa}$ 、 1200kPa の2種類の強度を検討対象とした。

表1に解析に用いた各材料の物性値をまとめる。レール、まくらぎ、バラスト道床など軌道構造の特性値は、関連する「鉄道構造物等設計標準・同解説 軌道構造」⁵⁾に準拠して設定した。地盤材料については、「鉄道構造物等設計標準・同解説 土構造物」⁶⁾を参考にして設定した。流動化処理土のヤング率は、中沢らの流動化処理土の一軸圧縮試験結果から、 $E_{50}=253q_{u28}$ として E_{50} を算定し、文献6に従い、ひずみレベルに応じた補正を行って設定した。

対象とする列車荷重として、M 荷重、列車速度 $V=160\text{km/h}$ のロングレール区間とし、速度衝撃率を考慮して変動輪重 $P_{dy}=135\text{kN}$ を設定した。解析では、この変動輪重 P_{dy} を車輪間隔 $L=2.1\text{m}$ の2軸载荷とし、レール上の4点に作用させた。そして、x 軸方向（線路方向）に軸荷重を移動させ、上部盛土に作用する応力が最大となる軸重作用位置での応答値について分析した。

図4に流動化処理土上面に作用する鉛直応力を示す。 $q_{u28}=600\text{kPa}$ 、 1200kPa の両ケースにおいて発生応力は 65kPa 未満であり、载荷応力比 0.2 未満となった。この検討結果と、列車荷重を受けない範囲での埋め戻しに用いる場合の流動化処理土の必要強度が $q_{u28}=500\text{kPa}$ であることや、軟弱路床の改良における必要強度⁶⁾ が $q_{u28}=600\text{kPa}$ である実態とのバランスを踏まえて、列車荷重を受ける土構造物での適用性を検証する条件として、 $q_{u28}=600\text{kPa}$ 、 1200kPa の仕様に対して、後述する各種

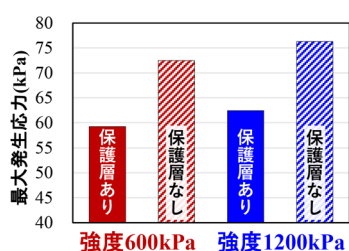


図4 流動化処理土上面での発生応力の比較



図5 繰返し載荷試験の供試体

表2 繰返し載荷試験の条件

Case	目標強度* q _{u28} (kPa)	水浸状態	材 齢	保護層の 有 無	試験時の 一軸圧縮 強度	載荷条件			150万回載荷後 残留沈下量 (mm)
						繰返し載荷 荷重** (kPa)	繰返し載 荷回数 (万回)	繰返し周 波数 (Hz)	
Case1200A	1,200	湿潤	28日	-	615	65→100***	150	10	0.19
Case1200B	1,200	水浸			65	0.27			
Case600A	600	湿潤				0.06			
Case600B	600	水浸				0.24			
Case1200C	1,200	水浸	約550日	有	3667	65	150	10	0.01
Case600C	600	水浸			2422				0.00

*28日養生後の目標一軸圧縮強度、**荷重振幅を指し、静的荷重18kPaを最小値として振幅65kPa、100kPaの荷重を載荷した

***振幅65kPaで150万回載荷後、振幅100kPaで150万回の載荷を実施した

検証試験を実施した。なお、保護層がない場合には、作用応力が増加する傾向も確認されており、保護層による作用応力の低減効果も確認した。

4. 構造・仕様の検証

4.1 列車の繰返し載荷に対する検証

前述した設定強度の流動化処理土を使用材料として、図5に示す供試体を作製し、鉄道総研所有の総合路盤載荷試験装置を用いて、列車荷重の繰返し載荷試験を行った。表2は載荷試験の条件を示している。前述した28日養生後の目標一軸圧縮強度 $q_{u28} = 600\text{kPa}$ 、 1200kPa の流動化処理土の供試体に対して、養生条件や流動化処理土上面の条件を変化させて載荷試験を実施した。

繰返し載荷は、図4に示す保護層ありの条件における発生応力を安全側に考慮して 65kN/m^2 、載荷周波数を 10Hz とした。なお、繰返し載荷試験は、28日屋外暴露後、550日屋外暴露後のそれぞれについて、試験前に流動化処理土上面を露出するためにバラスト、路盤、保護層などを撤去し、流動化処理土上面に直接載荷を行った。なお、屋外暴露は図5左に示すモールドを鉄道総研の盛土試験場に静置し、気温変化や降雨の影響を受ける条件である。また、水浸により累積変形量が増加する傾向が確認されていた¹⁾ことから、処理土上面を水で浸した「水浸条件」と処理土上面を水を含んだスポンジで被覆した「湿潤条件」の二通りの条件で載荷を行った。ここで、湿潤条件は表面が湛水には至っていないものの、湿潤したスポンジで被覆された状態であるため、流動化処理土

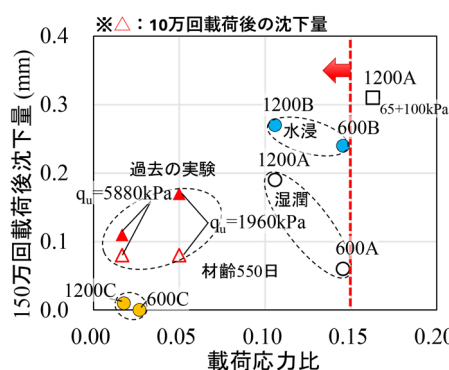


図6 繰返し載荷試験の結果

上面が前述した保護層で被覆された条件に相当する。

図6に繰返し載荷試験の結果として、載荷応力比と150万回載荷後の沈下量の関係を示す。載荷応力比は、繰返し載荷試験用供試体の流動化処理土打設時に製作し、繰返し載荷試験用供試体と同条件で養生した一軸圧縮試験用供試体から得られた q_u で載荷応力の最大値を正規化して求めた。

過去の実験³⁾で $q_{u28} = 5880\text{kPa}$ 、 1960kPa の流動化処理土を対象とした場合の沈下量は、それぞれ 0.11mm 、 0.17mm であり、この結果も併せて図6に示している。本検討では大幅に強度を低減したにも関わらず、材齢28日の結果においても残留沈下量は概ね同程度のレベルに留まっている。本試験での載荷応力比の最大値が 0.15 であり、流動化処理土の処理土密度が $1.52 \sim 1.59\text{g/cm}^3$ であったことから、載荷応力比の上限値 0.15 以下として強度を設定し、かつ、処理土密度を 1.60g/cm^3 以上とす

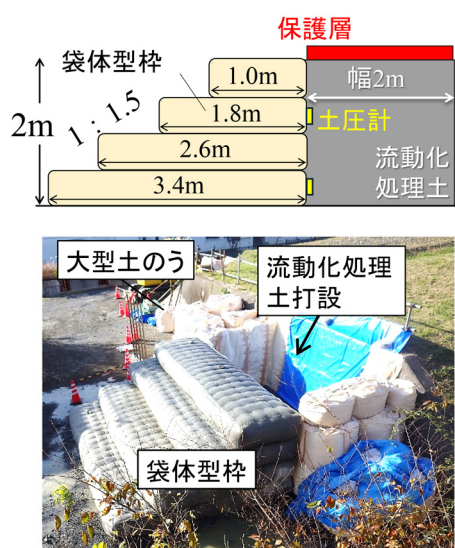


図 7 施工試験の模式図

表 3 施工試験における流動化処理土の仕様

材齢28日 目標強度	泥水密度 (g/cm ³)	固化材種類 添加量(kg)	処理土密度※ (g/cm ³)
1,200 kPa	1.46～1.50	高炉セメントB種 170	1.60

※処理土密度は現場試験での計測値



図 8 施工試験における処理土の打設状況

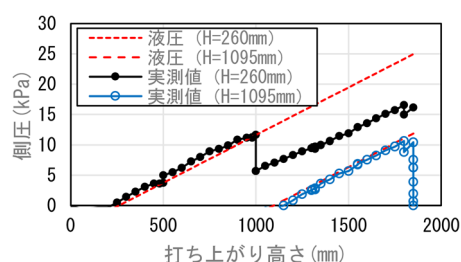


図 9 打設時の側圧の時刻歴

ることで、水浸状態であっても過去の実験¹⁾と同程度の微小な残留沈下量に抑えることができると考えられる。

また、図 6 からわかるように材齢 550 日の Case1200C、Case600C では強度が増加し、残留沈下量も減少した。本検討に用いた供試体について、28 日養生の供試体は室内養生を行い、550 日養生の供試体はバラスト・路盤・保護

層を施工した状態で屋外養生を行った。後述するように保護層施工した供試体では流動化処理土が湿潤状態を保つことが確認されている。これらのことから、含水比が維持された状態であれば流動化処理土は経年的に強度低下しないことが示唆された。これより、細粒分質砂を母材とした流動化処理土について、保護層を設けた提案構造の盛土とした場合、載荷応力比 0.15 を目安として、流動化処理土を $q_u=600\text{kPa}$ 以上、かつ、処理土密度を 1.60g/cm^3 以上とすることで、長期的な列車荷重作用下で微小な沈下量に留めることが可能と考えられる。

4.2 施工時側圧に関する検証

地上部の盛土材料の代替として用いる場合、必要強度の設定に加えて、施工時に流出を防止するための型枠が必要となるが、施工時の側圧や固化後の残留側圧の実態が不明である。そこで、図 7 に示す袋体型枠背面に流動化処理土を打設する施工試験を実施した。

ここで、袋体型枠は布製の袋内部にコンクリートや流動化処理土を充填することで図 7 に示すように膨張させることが可能な建設資材で、軽量のため運搬が容易で地上部における流動化処理土の施工において、流出防止を図る資材とし活用可能と考えられる。

流動化処理土の配合は表 3 に示すとおりである。なお、側圧についてはセメント添加量の多い 1200kPa で側圧を計測している。

流動化処理土の打設状況を図 8 に示す。流動化処理土は、高さ 1m を打設後、1 台のミキサー車を用いての運搬であったことから、ミキサー車がプラントと施工現場との往復に要する 3.75 時間をあけて残りの 1m を打設した。袋体型枠の設置に 2 日、流動化処理土の打設に半日程度を要し、高さ 2m の盛土の施工にかかった時間は 2.5 日であった。

打設時の型枠に作用する側圧は図 9 に示すように、袋体型枠側面に設置した土圧計により計測した。打ち上がり速度は、3.3～4.0m/h の条件で、打設時には液圧と同等の側圧が作用していた。また、施工試験時の側圧の減少する速度は、1.57kPa/h 程度であり、打設 24 時間後には側圧がほぼゼロとなった。

4.3 長期的強度発現特性

養生条件の異なる供試体を用いて、材齢 400 日までの強度確認試験を行った。対象とした供試体は、 $q_{u28}=1,200\text{kPa}$ (以下、タイプ 1200)、 600kPa (以下、タイプ 600) の 2 種類である。養生条件は乾燥と水浸とした。供試体寸法は $\phi 50\text{mm} \times \text{H}100\text{mm}$ である。

一軸圧縮強度 q_u と供試体の飽和度 S_r の推移を図 10 に示す。本検討では、28 日養生の時点では一軸圧縮強度は目標強度に到達していなかった。この理由としては、

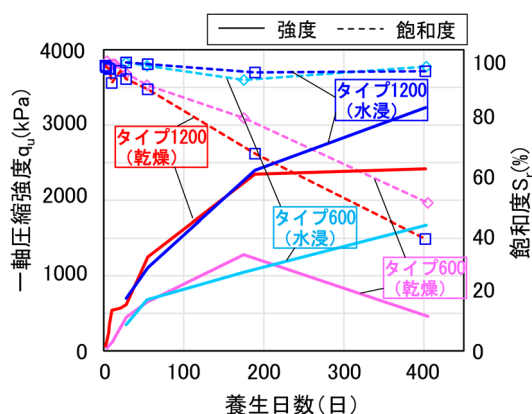


図 10 一軸圧縮強度と飽和度の変化

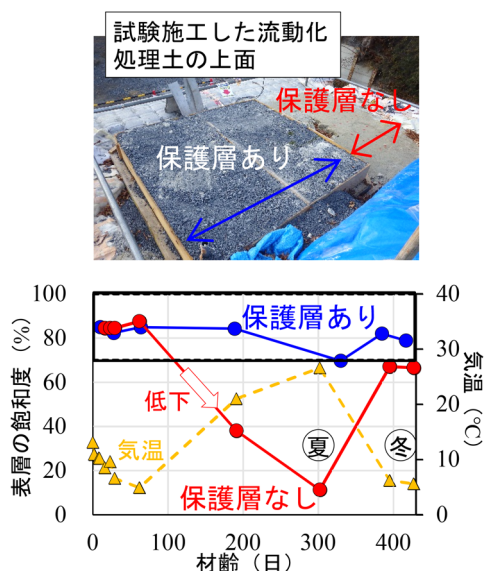


図 11 流動化処理土上面における飽和度のモニタリング結果

室内・現場での養生条件の違いが考えられる。このことから、後述するマニュアルでは、適切な現場室内強度比の設定方についても記述している。

長期的な強度発現特性についてみると、水浸条件の供試体では、材齢 400 日まで飽和度はほぼ一定となっており、タイプ 1200、600 ともに、 $S_r=93\sim100\%$ 程度を推移している。一方、乾燥条件の供試体では、材齢が進むにつれて飽和度が減少している。材齢 180 日の時点で、タイプ 1200、タイプ 600 ともに飽和度は減少しているが、 q_u は水浸条件の供試体と同等であり、この時点では乾燥による強度低下は生じていない。しかし、材齢 400 日の時点では、飽和度の減少に伴い q_u が水浸条件の供試体に対して低下している。以上から、乾燥が進行した場合、流動化処理土の q_u は顕著に低下するが、本実験の配合からは、飽和度 70% 程度までは乾燥による q_u の低下が生じないことが分かった。これより、流動化処理

土を適切に保護し飽和度を $S_r=70\%$ 以上に保つことで、強度や剛性低下を防止できるものと考えられる。

こうした乾燥に伴う強度低下現象と、提案した粒度調整碎石による乾湿抑制効果を検証することを目的として、前述した施工試験では、流動化処理土上面に粒度調整碎石 M-40 からなる保護層の施工領域・非施工領域を設け、含水比と一軸圧縮強度の長期計測を実施した。図 11 に飽和度の経時変化を示す。

保護層非施工部では特に流動化処理土表層部において含水比の変動が顕著であり $S_r=70\%$ 未満まで処理土表面が乾燥する傾向が確認できる。一方で、保護層施工領域では飽和度の変化が限定的で $S_r=70\sim100\%$ の範囲の状態に保たれており、保護層の効果が確認できる。また、深度方向にも保護層施工ありの部位では飽和度の低下が発生しないことも確認している。本検討でのモニタリング期間は鉄道構造物の供用期間と比べると短期であるものの、実際の運用では保護層上面に碎石路盤 30cm、道床バラスト約 30cm を敷設するため、処理土上面の湿潤状態は本検討以上に保持されやすいものと考えられる。

5. 設計・施工法マニュアル (案)

5.1 設計・施工法マニュアルの概要

一連の結果をもとに、「鉄道構造物に用いる流動化処理土の設計施工法マニュアル」に追記し改定案を作成した。従来の適用範囲であるトンネルインバート部と列車荷重を受けない部位の埋戻し部に加え、本研究の成果から、「列車荷重を受ける埋戻し土に用いる場合」、「盛土部に用いる場合」を適用範囲に追加した。

列車荷重を受ける埋戻しや盛土部として用いる場合には、表 4 に示す仕様を配合時の要求品質として設定した。また、長期的な湿潤状態を保持できる構造を必須とし、流動化処理土の表層に粒調碎石 ($t=300\text{mm}$) を用いた保護層を施工することを原則とした。

設計基準強度は、載荷応力比 (列車荷重による鉛直応力/流動化処理土の一軸圧縮強さ) が 0.15 以下となるように設定する必要がある。ただし、載荷応力比の検討を実施しない場合には、保護層 (粒度調整碎石 (M-40)、 $t=300\text{mm}$) の施工を原則としたうえで、標準設計基準強度として、600kPa を用いることとした。

また、利用上の留意点として、以下の項目などをマニュアルに記載している。

- ・保護層を施工する際に転圧に伴う流動化処理土の変状を防止するため載荷応力比 0.3 以下であることを確認する。保護層を設けるまでの間においても乾燥防止や確実な強度発現のために養生を行う。特に、若齢時の凍結を避けなければならない。
- ・列車走行前には、設計基準強度に達していることを確

表 4 マニュアルで設定した仕様の概要

載荷応力比	0.15以下
設計基準強度※	600kPa以上
処理土密度	1.60g/cm ³ 以上
ブリーディング率	1%未満
フロー値	160～300mm

※設計基準強度を設定する検討を実施しない場合

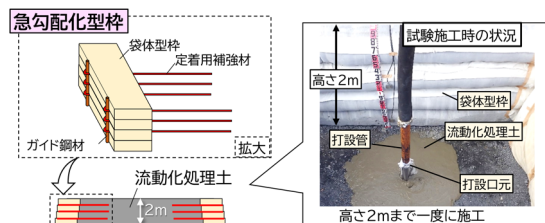


図 12 袋体型枠を活用した急勾配化構造

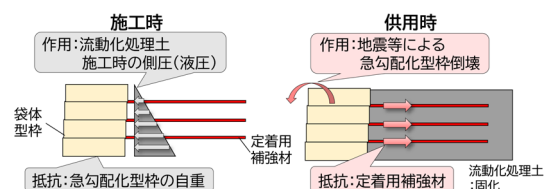


図 13 提案構造の施工時・供用時における作用・抵抗の模式図

構造条件：高さ3m・天端幅7.5m	作業期間	人工	コスト
L型擁壁 (従来構造) バラスト 路盤 盛土 プレキャスト擁壁	1.0	1.0	1.0
流動化処理土 (提案構造) 保護層 排水勾配3% 袋体型枠 幅1.3m 定着用補強材D29 定着長さ1.5m	0.8	0.9	0.4

図 14 提案構造とプレキャストL型擁壁との比較

認する必要がある。

- ・養生条件等により強度発現特性が異なるため、施工現場にて施工試験などから現場/室内強度比を考慮した安全率を設定する必要がある。施工現場にて現場/室内強度比を確認しない場合には現場/室内強度比等を考慮した安全率を2.3以上に設定する必要がある。

5.2 流動化処理土を用いた急勾配化構造の提案

施工試験では、袋体型枠の勾配は通常の盛土と同様に1:1.5としたが、十分な勾配が確保できない狭隘な条件への更なる適用範囲の拡張や、流動化処理土の施工量減少を目的とし、袋体型枠の急勾配化を検討した。施工時は高流動、固化後は高強度という流動化処理土の特徴を活用し、袋体型枠と補強材を併用した図12のような

急勾配化型枠に流動化処理土を打設する構造を提案した。

個々の袋体型枠の高さは0.5mであるが、これを垂直に3～4体重ねることで1リフト（一度に打設する高さ）が1.5～2.0m程度になることを想定している。

急勾配化型枠の構造的安定メカニズムを図13に示す。施工時（打設時）は流動化処理土の液圧が側圧として袋体型枠に作用するが、これに対して袋体型枠の自重で抵抗する。地震時以外の供用時においては、流動化処理土自体は固化するため、袋体型枠には列車荷重による土圧増分が主たる変動作用として作用する。地震時には、袋体型枠が慣性力や地震により作用する土圧の増分で転倒する恐れがあるため、袋体型枠と一体で設置した定着用補強材で抵抗する設計思想である。定着用補強材については、直径29mm以上の異形棒鋼を定着長さ1.5m程度とし、高さに応じて水平方向の配置間隔を設定する。既設もたれ擁壁の耐震補強のように、補強材をあと施工する方法も考えられるが、削孔など施工の労力が多大となるため、打設時は高流動という流動化処理土の特徴を活かし定着用補強材を打設時に設置することで、地震時を想定し袋体型枠の安定化を施工時に確保する工法である。

用地の制約があり、小規模重機のみ導入可能な狭隘な環境下で盛土を施工する工事を対象として、提案工法の使用効果について試算した。盛土高さは3mの複線盛土（天端幅7.5m）であり、比較工法は、L型擁壁と盛土の組み合わせによる構造とした。

図14に工事費用、工事期間の比較を示す。比較にあたっては、2022年度の労務単価等を用いた。L型擁壁は、プレキャスト材料を用いる場合に、施工が短期で完了し、施工性に優れた工法であるが、プレキャスト擁壁本体の価格が高価なため高コスト化するうえに大規模地震時にはL型擁壁が変状する恐れがあった。これに対して、流動化処理土を用いた提案構造では、L型擁壁よりも工期・人工を縮減し、急速化・省力化が実現可能ことが示唆された。

6. まとめ

鉄道土構造物の施工へと流動化処理土の適用範囲を拡張することを目的とした検討内容の概要と、検討結果を踏まえたマニュアルの改訂内容、さらに流動化処理土の特性を踏まえて提案した新構造について述べた。得られた知見は以下の通りである。

- ・列車荷重を受ける土構造物に流動化処理土を適用するためには、発生応力と一軸圧縮強度の比である載荷応力比を0.15未満とし、粒度調整砕石からなる厚さ30cmの保護層を施工する必要がある。
- ・現場と室内での強度発現特性の違いや、強度のばらつ

きに対する安全余裕を考慮して、2.3 程度の安全率を設定して施工時の必要強度を設定する必要がある。

- ・流動化処理土の特性を考慮して流動化処理土および急勾配化型枠と定着用補強材からなる新構造を提案した。提案構造の採用により、狭隘箇所土工構築物の施工の低コスト化・省力化の可能性を確認した。

文 献

- 1) 鉄道総合技術研究所：鉄道構築物に用いる流動化処理土の設計施工法マニュアル，pp.44-50，2005
- 2) 木幡行宏：流動化処理土の力学特性と今後の課題，土木学会論文集 F，Vol.62，No.4，pp.618-627，2006
- 3) 太田啓介，富田佳孝，高木翔太，中村貴久，中島進：流動化処理土の鉄道盛土材料への適用性に関する検討，土木学会論文集，第 79 巻，第 3 号，2023
- 4) 関根悦夫，鬼頭誠，垂水尚志，米澤豊司：安定処理した鉄道路盤の繰返し荷重に対する耐久性の検討，土木学会論文集，No.546／VI-32，pp.181-188，1996
- 5) 国土交通省鉄道局監修，鉄道総合技術研究所編：鉄道構築物等設計標準・同解説 軌道構造，丸善出版，2012
- 6) 国土交通省鉄道局監修，鉄道総合技術研究所編：鉄道構築物等設計標準・同解説 土構築物，丸善出版，2007

深層学習を活用した PC まくらぎのひび割れ検知手法

箕浦 慎太郎* 渡辺 勉*

Basic Study on Crack Detection Method for PC Sleepers Using Deep Learning Model

Shintaro MINOURA Tsutomu WATANABE

PC sleepers are an important component of railway tracks, contributing to the speed and safety of trains. In recent years, cracks have appeared in the longitudinal direction of some PC sleepers due to alkali-silica reactions, raising concerns about the efficiency of maintenance of these PC sleepers. Therefore, this study proposes using a deep learning model to estimate the position and length of cracks from top surface images of PC sleepers taken by a camera mounted on a maintenance vehicle. Examining the applicability of this method confirmed that this method can estimate the position and length of cracks on PC sleepers while preventing false detection of ballast and fastening devices. In addition, it was shown that this method can be employed to identify areas with a high concentration of cracks, as well as analyse crack patterns on commercial lines.

キーワード：PC まくらぎ，縦ひび割れ，画像解析，セマンティックセグメンテーション

1. はじめに

プレストレストコンクリート製のまくらぎ（以下、PC まくらぎ）は鉄道的高速化や安全性の向上に欠かせない軌道の重要な構成要素である。PC まくらぎは木まくらぎと比較して高い耐久性を有しており、また重量も大きい。維持管理コストの削減や軌道変位の抑制の観点等から PC まくらぎの導入が進められてきた。既設の PC まくらぎの中には、敷設から 50 年以上経過した PC まくらぎも存在し、例えば通過トン数（ある線区を通過する列車の総重量）が比較的大きな線路環境では摩耗の進行がみられるケースや¹⁾、凍害とみられる損傷により著しく耐荷力が低下しているケースなども散見されるなど^{2) 3)}、近年では PC まくらぎから PC まくらぎへの交換需要も増加している。そのため、既設 PC まくらぎの実態調査や交換基準に関する各種検討が進められている^{4) 5) 6)}。

図 1 に PC まくらぎに生じた縦ひび割れの例を示す。図 1 (b) の GC 側は軌間内側（ゲージコーナー側）を、(c) の FC 側は軌間外側（フィールドコーナー側）を指す。PC まくらぎの代表的な損傷形態の 1 つに、アルカリシリカ反応等に起因して PC まくらぎの長手方向にひび割れが生じるものがある⁷⁾。実際の維持管理においては、この縦ひび割れを目視により確認し、ひび割れの発生状況に応じてまくらぎ交換等の対策を行っているが、PC まくらぎの敷設本数は膨大であることから、現場で個々の PC まくらぎを調査する負担は大きく、またひび割れの長さの定量的な評価が困難であるといった課題があった。こ

れらを自動化、定量化できれば、維持管理作業や交換計画の効率化、安全性の向上が期待できる。

維持管理効率化のための対策として、近年では、営業列車や保守用車に鉄道の軌道を撮影するためのカメラを搭載し、それにより撮影された画像を用いて軌道部材の維持管理を実施している鉄道事業者もある。これらにより取得した画像データを活用して、現場に敷設された PC まくらぎの縦ひび割れの発生状況を自動的かつ定量的に把握することが可能となれば、PC まくらぎの維持管理の負担を大きく軽減できると考えられる。しかしながら、現状では PC まくらぎ上面のひび割れの有無自体を検知するシステムは存在するが、ひび割れ発生位置や長さ等の詳細な検査については、検査者が画像を確認する必要があるなど、完全な自動化には課題が残っている。

画像解析によりコンクリートに生じたひび割れを検知



(a) 軌道の構成の例（バラスト軌道）



(b) GC 側縦ひび割れ

(c) FC 側縦ひび割れ

図 1 軌道の構成と PC まくらぎに生じたひび割れの例

* 鉄道力学研究部 軌道力学研究室

する手法については、近年では深層学習を活用した手法が多く研究されている^{8) 9)}。一方で、PC まくらぎのひび割れ検知に関しては、PC まくらぎ周辺にはレール締結装置やレールといった部材の存在や周辺のバラスト（碎石）をひび割れとして検知してしまう可能性があることや、経年により表面状態が悪いPC まくらぎも多いことから、他の構造物等で使用されている手法やモデルをそのまま適用することが困難である。

そこで本研究では、PC まくらぎに生じたひび割れの検知に適用可能な、深層学習を活用したひび割れ抽出手法とひび割れの長さの推定手法を提案し、その適用可能性を検討した¹⁰⁾。

2. 提案する画像解析手法の概要

2.1 画像解析手法のフロー

図2に提案する画像解析手法のフローを示す。提案する手法では、PC まくらぎの上面を撮影した画像データを対象とした。まず、深層学習を活用した手法により、画像データ中のひび割れ部分をピクセル単位で検知し、その位置を示した画像（ひび割れ画像）を作成する。そして、ひび割れ画像に対して細線化処理を行うことで、ノイズを除去したうえでひび割れの長さを推定する。最後に、画像データの被写体の寸法から、推定されたひび割れ長さをピクセルから実際の長さ（mm）に換算する。

2.2 対象としたPC まくらぎ画像

図3にPC まくらぎ上面の画像の例を示す。本研究では、鉄道事業者が保有するシステムで取得可能な画像を対象とした。このシステムは、保守用車に搭載したカメ

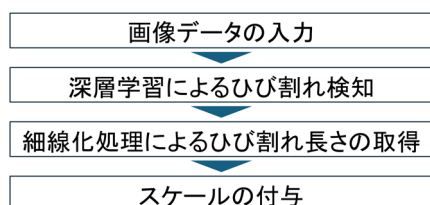


図2 画像解析手法のフロー

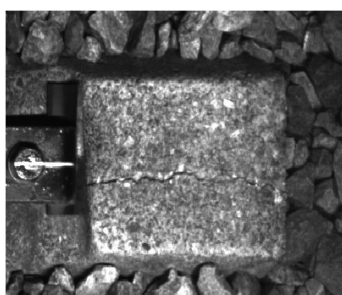


図3 PC まくらぎ上面の画像の例

ラを用いて軌道直上から撮影した画像を取得し、各まくらぎに対して、FC側2枚、GC側のレール付近2枚、まくらぎ中央部1枚の合計5枚の画像を出力可能である。今回の検討では、FC側の画像のみを対象とした。これは、GC側やまくらぎ中央部ではまくらぎ番号等の維持管理時のマーキングや信号設備等が比較的多く映り込み、別途対策が必要なためである。これらの画像への対応は今後の課題としたい。なお、各画像の解像度は400 × 340 ピクセルである。

2.3 深層学習によるひび割れ検知

本手法では、ひび割れの発生位置や長さを把握するために、セマンティックセグメンテーションを活用した画像解析を行うこととした。セマンティックセグメンテーションは、深層学習のアルゴリズムの一つであり、対象とする画像中の被写体の識別をピクセル単位で行うものである¹¹⁾。セマンティックセグメンテーションは、対象とする画像のダウンサンプリングを行いながら特徴量を抽出するエンコーダと、抽出した特徴を受け取って元の画像サイズの分類結果を表示するデコーダで構成されている。エンコーダ部では、畳み込みニューラルネットワーク（CNN: Convolutional Neural Network）を改良した全層畳み込みニューラルネットワーク（FCN: Fully Convolutional Networks）と呼ばれる手法を用いてダウンサンプリングを行いながら特徴を抽出する。デコーダではその逆を行うことで元の画素サイズまでアップサンプリングを行い、ピクセル単位での分類結果を提示する。

図4に本研究で構築したひび割れ検知用のモデルの概要を示す。今回の検討では、セマンティックセグメンテーション用の学習モデルとして、U-net¹²⁾を基本としたモデルを構築した。U-netとは、セマンティックセグメンテーション用のモデルの一つであり、特徴としてはエンコーダの特徴マップをデコーダの特徴マップに連結させるSkip connectionを持つことである（図4中の灰色の矢印）。Skip connectionによりエンコーダで失われた局所情報や空間的な位置情報をデコーダに渡すことで、アップサンプリング後にも位置情報が失われず高精度な分類が可能となる。今回の検討では、U-netの各畳み込み層にバッチ正規化層（Batch Normalization Layer）を追加したモデルも構築した。バッチ正規化層を追加することで、学習の効率化や過学習の抑制が期待できる¹³⁾。今回のモデルでは、最終的にはピクセル単位でひび割れの有無を判定させる2クラス分類を行うモデルとし、出力層における活性化関数をSigmoid関数、それ以外の活性化関数をReLU関数とした。ReLU関数とは、入力値が0未満の場合には0を、0以上の場合には入力値を出力する関数である。Sigmoid関数は入力値を0～1の範囲の数値に変換して出力する特徴を持つ。出

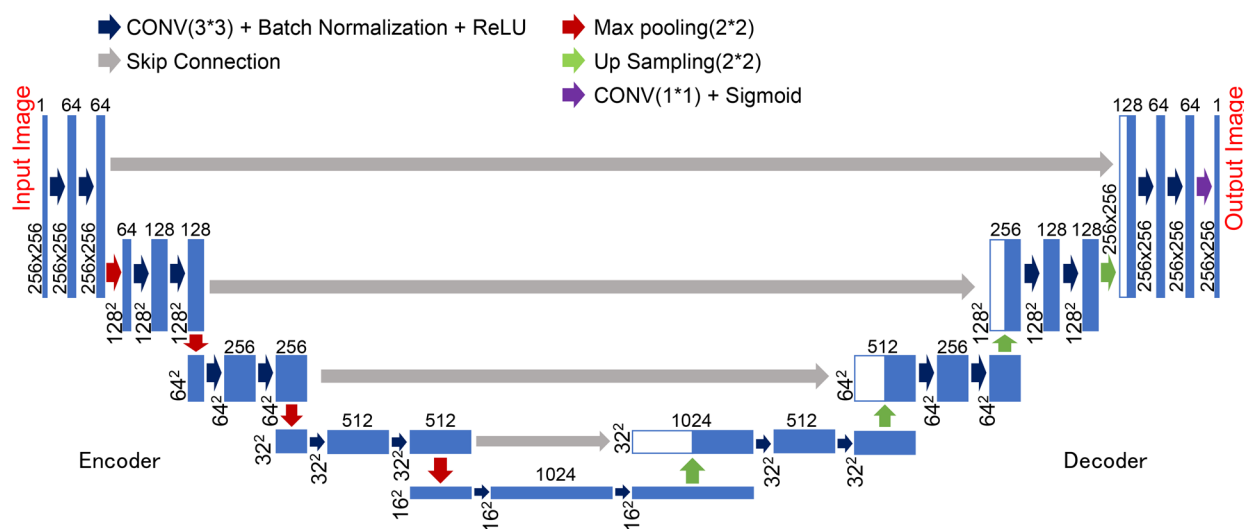


図4 モデル構成

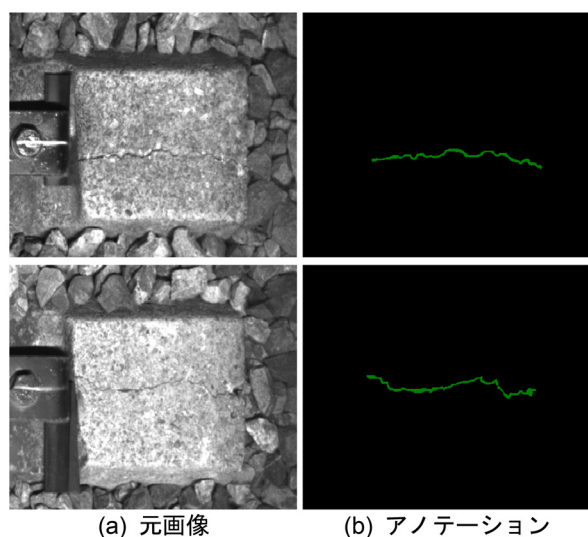


図5 アノテーションの例

力層では、各ピクセルにおいて Sigmoid 関数の出力結果を 256 段階に分割し、その値を画素値とする画像データを作成しており、これは特定のピクセルの位置にひび割れが存在する確率を 256 段階で示している。

図5にアノテーションの例を示す。アノテーションでは対象画像中でひび割れの位置に相当するピクセル部分のみを塗りつぶした（緑色の部分）。今回は、186 枚分の画像に対してアノテーションを行った。なお、アノテーションの際には、ひび割れの判定は PC まくらぎが撮影された画像データのみを確認して行っており、対象となっている実物の PC まくらぎの表面を別途調査したわけではない。そのため、この画像中から判別できないほどの微細なひび割れは対象外となる。学習では、上記のアノテーションを行った 186 枚の元画像に対してランダムに拡大、縮小、回転、水平移動を行うことでデータ

拡張を行い、最終的に 1000 枚のアノテーション済み画像を用意した。このうち、900 枚を学習用データとして、残りを精度検証用データとして使用した。画像データのサイズについては、元の画像（400×340 ピクセル）の左右両端から 30 ピクセルを削除して正方形の画像に変換したのちに、一辺の長さが 256 ピクセルとなるようにリサイズした。学習の Epoch 数（すべての学習データを用いてモデルを繰り返し学習させた回数）は 100 とした。

2.4 細線化処理によるひび割れ長さの取得

図6にセマンティックセグメンテーションを活用して抽出したひび割れ画像からひび割れ長さ算出のためにひび割れの細線化を行った例を示す。図6(b)に示すように、セマンティックセグメンテーションによりひび割れの位置のみを抽出した画像（ひび割れ画像）では、ひび割れは幅を持っており、その幅はデータによって様々であることから、単純にこの面積を求めただけではひび割れの長さを求めることができない。また、ひび割れ画像ではバラストの一部や骨材等が微小なひび割れとして誤検知されることも考えられる。そこで、このひび割れ画像に対して、まず一定値以上の画素値を有する部分のみを残す二値化処理を行ってひび割れ部分のみを抽出した（図6(c)）。そして、二値化した画像に対して、連続した領域ごとに分割し（図6(d)）、分割した領域ごとに面積を算出した。通常ひび割れは連続的に生じており、面積が一定の値以下の領域（図6(d)中の水色及び青で示したピクセル）に関しては、画像のノイズや表面に露出した粗骨材のエッジ等をひび割れとして誤検知した可能性がある。そこで、面積が一定値以下の微小領域については、誤検知したものとして除去した（図6(e)）。その後、残った領域に対して、細線化処理を施

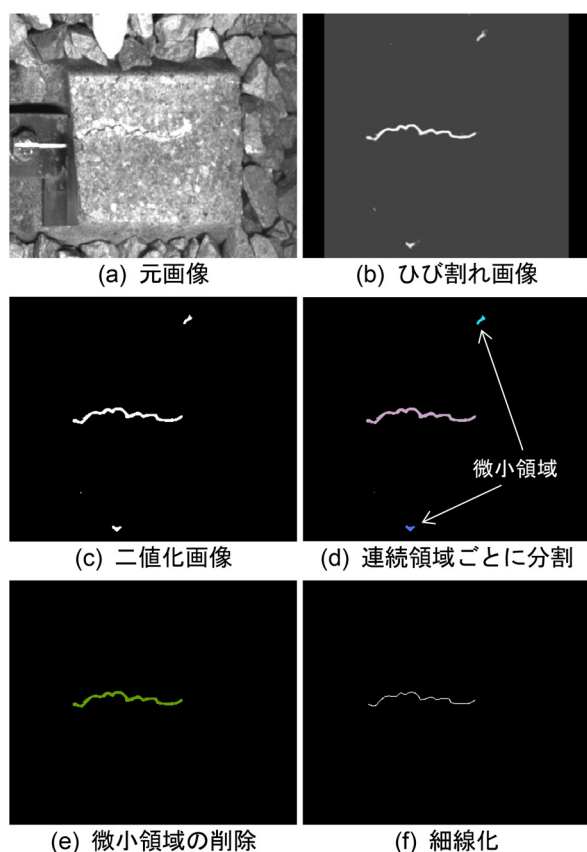


図6 ひび割れ長さ算出用の細線化処理の例

した(図6(f))。細線化処理とは、与えられた2値画像を幅1ピクセルの線画像に変化する処理であり、今回はZhang-Suenの細線化アルゴリズム¹⁴⁾により細線化を行った。細線化を行うことにより、ひび割れ位置を幅1ピクセルの線に変換することが可能となり、この状態でピクセル数をカウントすることでひび割れの長さを求めることができる。なお、この手法で求められるひび割れ長さは、まくらぎ長手方向のひび割れの長さではなく、例えばまくらぎの幅方向のひび割れや、ひび割れが大きく湾曲している場合、複数のひび割れが生じていた場合などには、ひび割れ長さがPCまくらぎの設計上の長手方向長さ以上の値として算出されることがある。

2.5 スケールの付与

図7にスケールの付与のために長さを測定した位置を示す。細線化処理により得られるひび割れ長さの単位はピクセルであり、実際の長さ(mm単位)に変換する必要がある。そこで、まずPCまくらぎ画像を合計14枚選択し、それらの画像上で図6に示す位置のピクセル単位での長さを測定した。そして、それらの値と設計値からピクセルあたりの実長さ(mm/ピクセル)をそれぞれ求め、平均化した。ここで得られた値を用いてピクセル単位で得られたひび割れ長さをmmに換算した。なお、

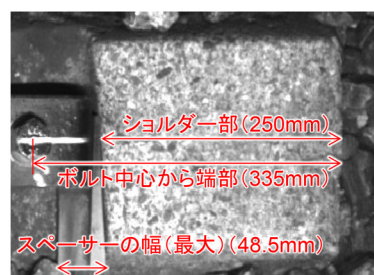


図7 スケールの付与のために長さを測定した位置

本手法は車両等に固定されたカメラを使用して、撮影対象のPCまくらぎとカメラとの距離を一定に保ったまま連続的に撮影する条件を想定しており、撮影条件が変化した場合にはピクセルあたりの実長さは変化する。今回の撮影条件では、1ピクセルあたり約1.0mmであった。

3. 提案手法の精度検証

3.1 精度検証手法

提案手法におけるひび割れ検知精度の検証として、本手法で推定したひび割れ長さの推定結果と、目視で確認したひび割れ長さを比較することで精度検証を行った。具体的には、まずFC側のPCまくらぎ画像から、ひび割れの発生していない画像を含めてランダムに300枚抽出し、それらの画像から目視で確認できるひび割れの位置上にドローソフトで線を引き、その線の長さを求めた。そして、この目視により求めたひび割れの長さを「正解値」とし、2章で提案した手法により推定したひび割れ長さを「推定値」として、それらを比較することで精度の検証を行った。なお、対象とする画像の解像度の関係上、ひび割れ終端部の判定が目視では明確ではないケースや、最小でも1ピクセル単位での判定となることから、目視での測定結果は誤差を含むと考えられる。また、ドローソフトで作成した線から長さを取得する手法は、提案手法における処置(細線化及びピクセル数カウント)と同様とした。

3.2 検証結果

図8に今回の学習過程(Accuracy及びLoss)を示す。ここで、Trainは学習用データ、Valは精度検証用データに対する結果を示す。この図より、今回の学習モデルは精度検証用データに対してもEpoch数が30付近以降から99.3%以上の精度でひび割れを抽出できていることが分かる。ただし、ひび割れの面積はそれ以外の部分の面積と比較して小さく、すべてをひび割れ無しと判定してもAccuracyは95%程度になる事に留意する必要がある。また、Epoch数が30付近以降では、学習用データ及び精度検証用データのAccuracyは99.3%程度、

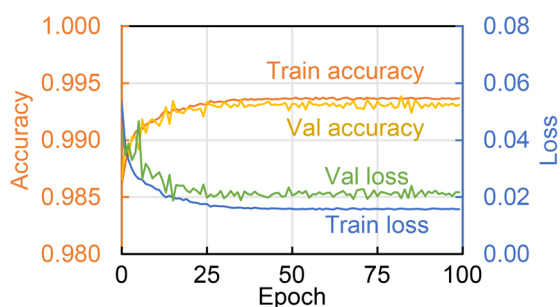


図 8 学習過程

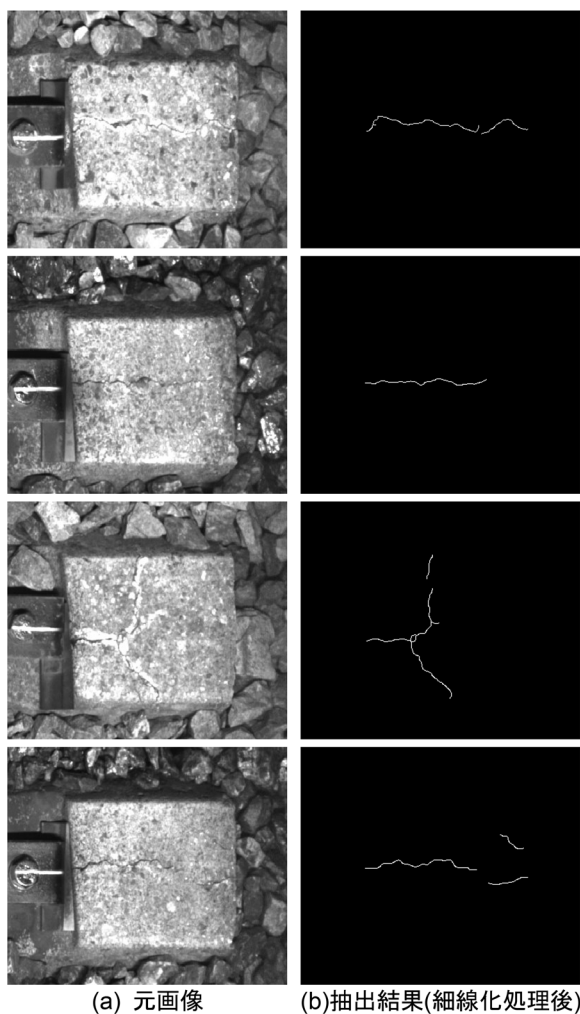
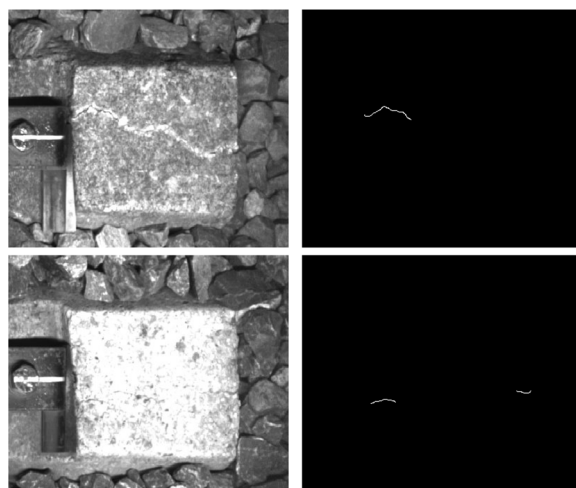


図 9 ひび割れ抽出結果の例（良好に抽出）

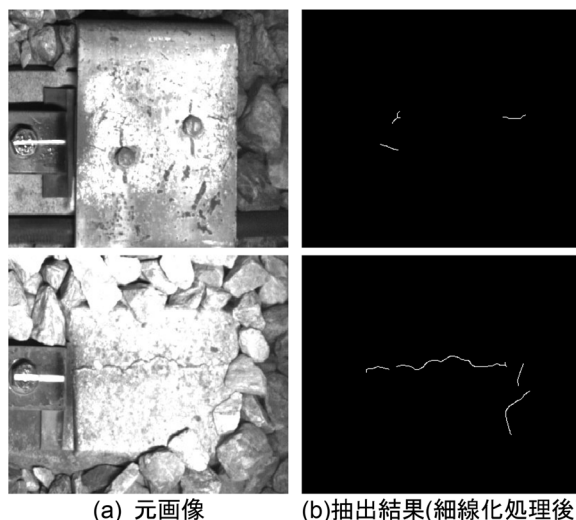
Loss は 0.02 程度でそれぞれ落ち着いており、十分な学習が行われかつ過学習も生じていないことが確認できる。

図 9～図 11 にひび割れの抽出結果の例を示す。図 9 に示すように、多くの画像データでは目視で画像中に確認できる位置とおおむね同じ位置にひび割れを抽出できており、また、レール締結装置やバラストには誤検知がみられないことが確認できた。一方で、一部では図 10 に示すように、現場でひび割れを確認しやすいようにつけられたマーカーにより、ひび割れが画像中で確認しづ



(a) 元画像 (b)抽出結果(細線化処理後)

図 10 ひび割れ抽出結果の例（検知不足あり）



(a) 元画像 (b)抽出結果(細線化処理後)

図 11 ひび割れ抽出結果の例（過検知あり）

らいデータや、露光条件が悪いデータ等では、一部のひび割れが検知できない（検知不足）ケースもあった。また、図 11 に示すように、ケーブルを保護するための機器類等が映った画像データや、PC まくらぎ上にバラストが乗ってしまっているデータ等では、ひび割れではない部分を過検知するケースも見られた。これらの誤差が生じやすい画像データを、別の画像処理手法等により識別し、ひび割れ検知の対象外とすることで、より実用的な手法となると考えられる。

図 12 にひび割れ長さの推定結果と目視による正解値の比較を示す。図中の黒い点線は正解値と推定値が一致する値を示し、この線より下では推定値は正解値より短く（過少検知）、逆に線の上は推定値の方が長い（過大検知）の状態となる。図より、正解値と推定値には強い相関がみられ、それらの値もおおむね一致していた。ただし、推定値は正解値よりも低めの値を示した。これは、

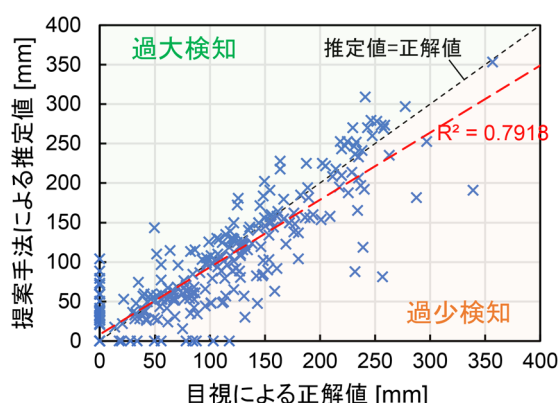


図 12 ひび割れ長さの推定結果と目視による正解値の比較

ひび割れ幅の小さな微小ひび割れを十分に推定できなかった可能性がある。ひび割れ幅の影響については今後の課題としたい。今回の精度検証において対象とした300枚の画像のうち、正解値でひび割れ有と判定されたものは225枚であった。このうち、推定値が0mmとなり全く検知できていないケースは約4.9%（225枚中11枚）に留まっていた。また、正解値で120mm以上のひび割れが生じたケースでは、ひび割れ長さの検知結果に過不足が生じるケースがあるものの、ひび割れの存在自体はすべて検知できていた。正解値が0mmのケースにおいて、推定値として最大で100mm程度のひび割れが検知されているなど過検知がみられるが、正解値が0mmとなったケースの推定値の平均値は15.7mmであり、約63%（75枚中47枚）では推定値も0mmとなっていた。なお、一部のまくらぎでは、ショルダー部の設計での長さ（中心部で250mm）以上のひび割れが生じているものがみられるが、これは、前述の通り、ひび割れが湾曲していたことや、複数のひび割れが生じていたことが原因と考えられる。

図13に正解値と推定値の誤差（推定値-正解値）の頻度分布を、図14に正解値と推定値の誤差率の絶対値（ $|推定値 - 正解値| \div 正解値$ ）の累積頻度を示す。誤差率の算出では、正解値のひび割れ長さが0に近いと発散するため、正解値が一定の長さ以上（50mm以上～200mm以上）のものを対象として誤差率を算出した。これらの図より、誤差 ± 10 mm以内のデータが検証用データ全体の約39%、 ± 20 mm以内が約54%、 ± 30 mm以内が約69%であった。また、誤差率が20%以下のデータは、正解値が50mm以上のデータで約60%、正解値が200mm以上のデータでは約75%と、特に長いひび割れが生じているPCまくらぎに対して一定の精度で推定が可能であることが確認できた。100mm以上の誤差が生じているものもあるが、PCまくらぎは通常1本機能を失ったとしても、その前後のPCまくらぎが健全で

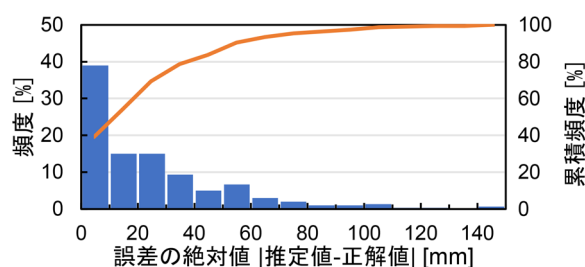


図 13 推定値と正解値の誤差の頻度分布

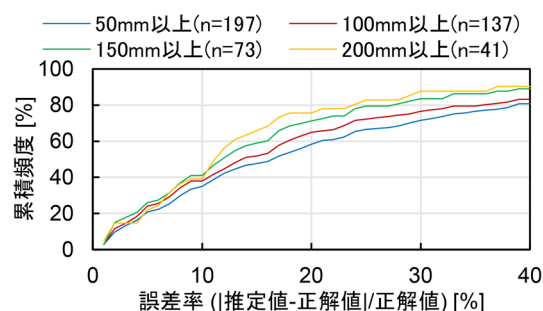


図 14 誤差率の累積頻度分布

あれば走行安全性に問題はないため、注意を要するPCまくらぎのスクリーニング等、現場でのPCまくらぎのひび割れ発生状況の確認に適用可能であると考えられる。

4. 開発手法の適用可能性の検討

4.1 検討方法

前章の検討により、提案する手法はPCまくらぎのひび割れ発生状況の確認に適用できる可能性が示された。そこで本章では、その適用可能性の検討として、実際の営業線で撮影された画像に対して本手法を適用し、PCまくらぎのひび割れの発生状況の確認を行った。対象とした線区の延長は37kmである。対象線区は複線区間であるが、本検討では、そのうち片側の線路を対象とし、PCまくらぎの右側FC側（右側ショルダー部）に生じたひび割れを対象として、その発生位置や長さに関する調査を実施した。

4.2 PCまくらぎ上のひび割れ発生位置の把握

図15にひび割れの発生位置と頻度を示す。対象とした画像データは、撮影されたPCまくらぎの画像中の位置が若干異なるものが含まれる。そのため、ひび割れがPCまくらぎ上のどの位置に生じているかを把握するために、まず撮影画像の位置合わせを行った。図15(a)に位置合わせ後の画像すべてを平均化したものを示す。この図より、平均化した画像でもPCまくらぎやレール締結装置の形状がはっきりと確認できており、位置補正は適切に行われていたと考えられる。図15(b)には、

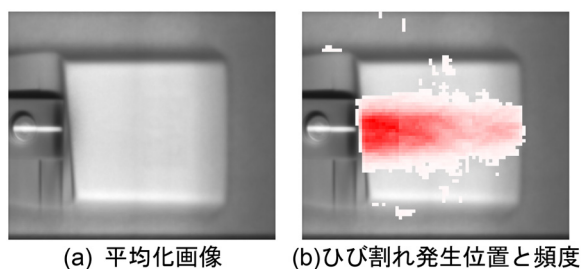


図 15 ひび割れの発生位置と頻度

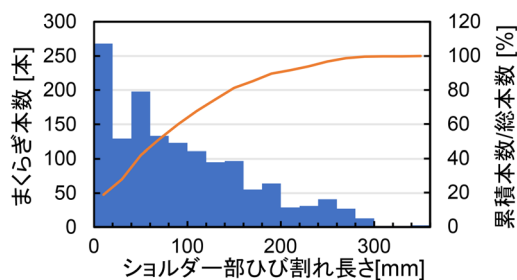


図 16 ひび割れの長さで発生本数の分布

図 15 (a) の画像に、ひび割れの発生頻度を表す図を重ねたものを示す。この図では、5×5 ピクセルごとのひび割れ発生頻度を、最大の発生頻度である 11% が上限となるように正規化した上で、255 段階で示しており、赤色が濃い部分がひび割れの発生頻度が高い部分である。一部バラスト上でもひび割れが検知されているが、これはバラスト自体やバラストと PC まくらぎの境界をひび割れとして誤検知したものである。ただし、バラスト部で誤検知されたと考えられるひび割れは、PC まくらぎ上面のひび割れと比べるとわずかであり、本手法でバラストがひび割れとして誤検知される可能性は低いと考えられる。また、ひび割れは PC まくらぎのレール方向に対する中心部付近のレール締結装置付近に多く生じることが確認できる。このように、今回対象とした線区及び撮影条件では、開発手法を活用することで PC まくらぎ上面のひび割れの発生位置の傾向を把握することが可能であった。

4.3 線区ごとのひび割れ発生状況の把握

図 16 に対象線区の PC まくらぎ右側ショルダー部に生じたひび割れ長さとその本数の分布を示す。対象とした線区では、約半数が長さ 80mm 以下のひび割れであったが、ショルダー部のほぼ全体にひび割れが生じていると考えられる長さ 240mm 以上のひび割れが生じた PC まくらぎも、全体の 3.3% 程度存在した。

図 17 に対象線区の 1km ごとのひび割れが生じた PC まくらぎの本数を示す。図に示すように、ひび割れが生じた PC まくらぎは全区間にわたってまんべんなく生じているわけではなく、特定の区間に集中して発生してい

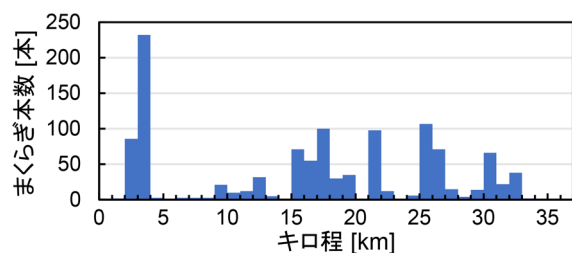


図 17 ひび割れの生じた PC まくらぎの本数 (1km ごと)

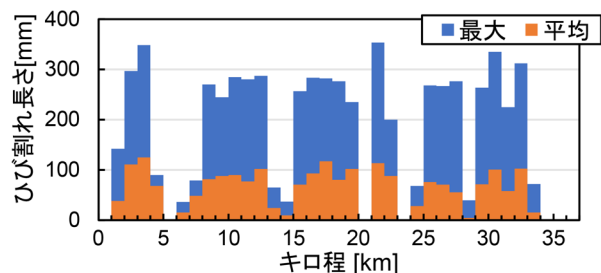


図 18 1km ごとのひび割れ長さの最大値と平均値

ることが確認できる。対象線区内ではキロ程が 3km～4km の付近で特に多くの PC まくらぎにひび割れが生じていた。なお、図中のキロ程は、対象線区のもっとも起点に近い側を 0km として表示したものであり、実際の線区の管理上のキロ程とは一致しない。

図 18 に 1km ごとの PC まくらぎの最大ひび割れ長さと平均ひび割れ長さを示す。最大ひび割れ長さについては、1km ごとのひび割れが生じた PC まくらぎの本数とは異なり、ひび割れが生じた PC まくらぎが存在する多くの区間でおおむね 250mm 程度となった。平均ひび割れ長さについても同様に、おおむね 80mm 程度となっていた。以上の通り、開発手法を用いることで、線区ごとのひび割れ長さの傾向等を把握することが可能であった。

5. まとめ

本研究では、ひび割れの生じた PC まくらぎの維持管理の効率化のために、深層学習を活用した PC まくらぎのひび割れ検知及び長さの推定手法を提案し、その適用可能性を検討した。得られた成果は以下の通りである。

1. PC まくらぎのひび割れを抽出する手法として、セマンティックセグメンテーションを用いて保守用車画像からひび割れを検知し、二値化及び細線化処理により誤検知を取り除いたひび割れ位置及び長さを推定する手法を導入した。
2. 導入した手法により、バラストやレール締結装置の誤検知を抑制してひび割れ発生位置及び長さを取得可能であることを確認した。また、精度検証の結果、ひび割れ長さが 200mm 以上のケースでは、その約

75% でひび割れ長さの誤差率が 20% 以下となる等、特に長いひび割れが生じている PC まくらぎに対して、ひび割れの長さを一定の精度で推定可能であることが確認された。

3. 延長 37km の実際の現場で取得した画像に対し、本手法の適用可能性を検討した結果、ショルダー部に生じたひび割れは、約半数が長さ 80mm 以下であるものの、ショルダー部の全域にひび割れが生じたケースも約 3.3% 存在することや、PC まくらぎのひび割れは特定の区間に集中して発生する傾向にあること等、今回の対象線区及び撮影方法ではひび割れ長さや発生位置等の傾向を把握可能であり、本手法により PC まくらぎのひび割れ状態把握のスクリーニングが可能であることを示した。

今後は、学習データの追加や、誤差が生じやすいデータをあらかじめ取り除く機能の追加などにより、更なる検知精度向上を図るとともに、今回の検証とは異なる線区及び撮影条件等での適用可能性の検討を行う予定である。さらに、より適切な健全度判定基準の提案や、他の損傷形態が複合的に生じたケース等に対応するために、アルカリシリカ反応等の発生要因とひび割れ長さの関係性といった現象解明の深度化についても取り組む予定である。

文 献

- 1) 箕浦慎太郎, 渡辺勉, 鈴木大輔, 上半文昭: 営業線 PC まくらぎの摩耗性状とその耐荷力への影響に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.2, pp.1345-1350, 2015
- 2) 渡辺勉, 飯島亨, 石田哲也: 凍害を受けた PC まくらぎの実態調査と健全度評価基準の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.42, No.1, pp.665-670, 2020
- 3) 箕浦慎太郎, 渡辺勉, 松岡弘大, 後藤恵一: 凍害を受けた PC まくらぎの振動特性に着目した健全度評価手法の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.43, No.1, pp.616-621, 2021
- 4) 渡辺勉, 後藤恵一, 箕浦慎太郎, 池田学: 経年並びに通ト
- ンが PC まくらぎの耐荷力に及ぼす影響に関する実態調査, 鉄道総研報告, Vol.37, No.4, pp.17-23, 2023
- 5) 中村貴章, 田淵剛: PC まくらぎの現状評価, 土木学会第 68 回年次学術講演会, Vol.68, No.VI-521, pp.1041-1042, 2013
- 6) 須江政喜, 奥村悠樹, 堀雄一郎: 既設 PC まくらぎの劣化状態に関する研究, 鉄道技術連合シンポジウム講演論文集, Vol.21, No.S2-4-6, 2014
- 7) 箕浦慎太郎, 渡辺勉, 井上寛美, 片山雄一郎: 縦ひび割れの発生した PC まくらぎの健全度評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.2, pp.1585-1590, 2016
- 8) 青島亘佐, 山本拓海, 中野聡, 中村秀明: 深層学習によるセグメンテーション手法を用いたコンクリート表面の変状領域の検出, AI・データサイエンス論文集, Vol.1, No.J1, pp.481-490, 2020
- 9) 藤田悠介, 小林圭太, 浜本義彦: 深層学習を用いたひび割れ抽出の効率化および高精度化, 土木学会論文集 F3 (土木情報学), Vol.77, No.1, pp.13-41, 2021
- 10) 箕浦慎太郎, 渡辺勉: 深層学習を活用した PC まくらぎのひび割れ検知手法に関する基礎的検討, AI・データサイエンス論文集, Vol.4, No.3, pp.285-292, 2023
- 11) Badrinarayanan, V., Kendall, A. and Cipolla, R.: Segnet: A deep convolutional encoder-decoder architecture for image segmentation, IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence, vol.39, no.12, pp.2481-2495, 2017.
- 12) Ronneberger, O., Fischer, P. and Brox, T.: U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation, Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention – MICCAI 2015, vol.9351, 2015.
- 13) Ioffe, S. and Szegedy, C.: Batch normalization: accelerating deep network training by reducing internal covariate shift, ICML'15: Proceedings of the 32nd International Conference on International Conference on Machine Learning, Volume 37, pp.448-456, 2015.
- 14) Zhang, T.Y. and Suen, C.Y.: A fast parallel algorithm for thinning digital patterns, Communications of the ACM, Vol. 27, Issue 3, pp.236-239, 1984.

巨大地震による砂地盤の定常化メカニズムの解明と有効応力解析手法の開発

小野寺 智哉* 伊吹 竜一* 井澤 淳*
福武 毅芳** 桐山 貴俊*** 馬淵 倉一# 児玉 剛#

Experimental Analysis of Mechanism of Steady State Caused by Huge Earthquakes
and Development of an Effective Stress Analysis Method for Sandy Soil

Tomoya ONODERA Ryuichi IBUKI Jun IZAWA
Kiyoshi FUKUTAKE Takatoshi KIRIYAMA Souichi MABUCHI Tsuyoshi KODAMA

When designing railway structures to withstand huge earthquake motions, it is necessary to evaluate the response of ground using effective stress analysis. It is known that the “steady state” occurs during large soil deformation. In this steady state, shear strain increases while stress remains constant. Currently, there have been few researches on the steady state mechanism under actual ground conditions. This study examined the behavior of sandy soil under large deformation conditions using elemental tests with Toyoura sand. Then, an effective stress analysis method which can reproduce the steady state behavior was proposed.

キーワード：巨大地震，液状化，定常状態，有効応力解析，拡張おわんモデル

1. はじめに

鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計¹⁾（以下、耐震標準）では、構造物の建設地点で起こり得る最大級の地震動を L2 地震動として設定することとされている。特に標準 L2 地震動よりも大きな地震動の発生が危惧される箇所では、強震動予測手法に基づき地点依存の地震動を算定する必要があるが、震源域近傍等では極めて大きな地震動が算定される可能性がある。実際、M7.6 の直下型地震が発生した令和 6 年能登半島地震では最大で 2,000Gal を超えるような地表面地震動が記録されている²⁾。

こうした巨大地震時の液状化挙動を検討する場合、比較的密な地盤が液状化する可能性や、せん断応力一定のまません断変形が進行する定常化³⁾と呼ばれる現象が発生する可能性がある。後述するように、定常化の発生は液状化層の応答加速度や応答変位に大きく影響するため、鉄道構造物の設計に際しては、定常化を考慮して精緻に応答値を算定する必要があると考えられる。本研究では、巨大地震時の液状化地盤の挙動をハイブリッド地盤応答試験⁴⁾等の各種試験により把握するとともに、その挙動を評価可能な有効応力解析手法を構築することを

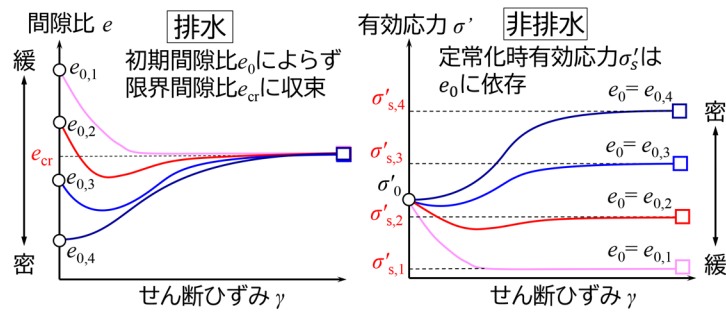
目的とする。本報告では、第 2 章において定常化のメカニズムについて議論した後、第 3 章では定常化現象を把握するために実施した室内試験の結果等を示す^{5) 6)}。第 4 章では、構築した有効応力解析手法の概要と妥当性を検証した結果について示す⁷⁾。

2. 地盤の定常化現象

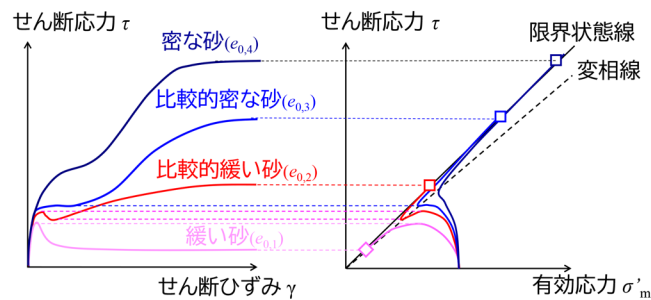
2.1 土の限界状態による定常化

Yoshimine and Ishihara (1998)³⁾ は、砂が初期密度により異なる有効応力レベルで定常化に至り、せん断応力が一定のまません断ひずみが進展する状況について整理している。これは砂がいわゆる限界状態に至ることで発生する定常化現象である。飽和した砂が限界状態に至るまでのせん断時の変形挙動を図 1 (a) に模式的に示す。排水条件で砂をせん断した場合、間隙比の大きい緩い砂は体積圧縮を、密な砂は体積膨張を示すが、最終的には初期の間隙に依らず一定の間隙比に収束する。このように体積が一定のまません断変形が進行する状態が土の限界状態として定義され、この時の間隙比を限界間隙比 e_{cr} とする。一方、体積変化が生じない非排水条件の場合、緩い砂はせん断に伴って有効応力が減少し、密な砂はせん断に伴って有効応力が回復し、最終的に有効応力一定のまません断変形が進行する。これは非排水条件での限界状態であるが、一般的に定常化と呼ばれることが多い。なお、定常化に至る有効応力 σ'_s は、初期間隙比 e_0 によって決まる。非排水条件（地震時の挙動に対応）において、

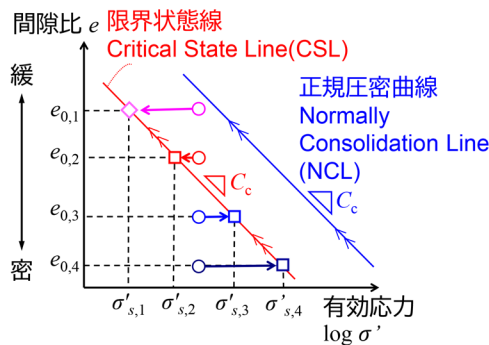
* 鉄道地震工学研究センター 地震動力学研究室
** 株式会社大崎総合研究所
*** 清水建設株式会社
伊藤忠テクノソリューションズ株式会社



(a) 排水・非排水条件でのせん断挙動



(b) 非排水条件における限界状態



(c) e - $\log \sigma'$ 上での挙動

図 1 単調せん断時の土の変形挙動概念図

砂が定常化に至るまでのせん断の様子を図 1 (b) に示すが、緩い砂は軟化しながら、密な砂は硬化しながら、せん断応力～有効応力平面上に直線で示される限界状態線上で定常化に至ることが知られている。なお、 e - $\log \sigma'$ 平面上に示した限界状態線は正規圧密線と平行であることも知られている⁸⁾ (図 1 (c))。上記の現象を「限界状態による定常化」と呼び、その際の間隙比および有効応力を判断するためには限界状態線を把握する必要がある。

2.2 負圧限界による定常化

密な砂を非排水条件でせん断すると、間隙水圧が負圧に至る場合もある。この負圧には下限があり、限界状態による定常化の前に、負圧限界によって定常化に至ることが考えられる。図 2 に飽和地盤内の応力状態を模式的

に示す。地盤内応力は大気圧を基準としたゲージ圧で示するのが一般的であり、ゲージ圧 0kPa は絶対圧では約 101kPa に相当する。地盤が地震時の繰返しせん断を受けた場合、間隙水圧が上昇、有効応力が低下して液状化状態に至るが、密な砂ではサイクリックモビリティにより間隙水圧が低下し有効応力が回復する。間隙水圧は負圧まで低下する場合があるが、絶対圧で 0kPa (ゲージ圧で約 -101kPa) 以下までは低下できないため、回復する有効応力の上限 $\sigma'_{\max}$ は図 2 に示す通り、間隙水圧を u 、全応力を σ_c として、

$$\sigma'_{\max} = u + \sigma'_c + 101 = \sigma_c + 101 \text{ (kPa)} \quad (1)$$

となる。なお、要素試験や模型実験においては、試験装

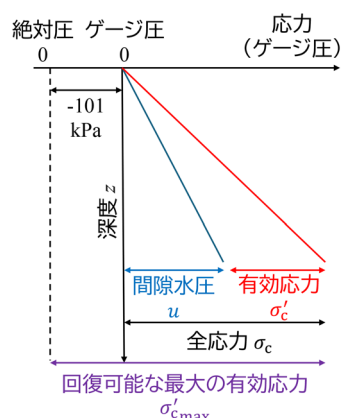


図2 負圧限界発生の概念図

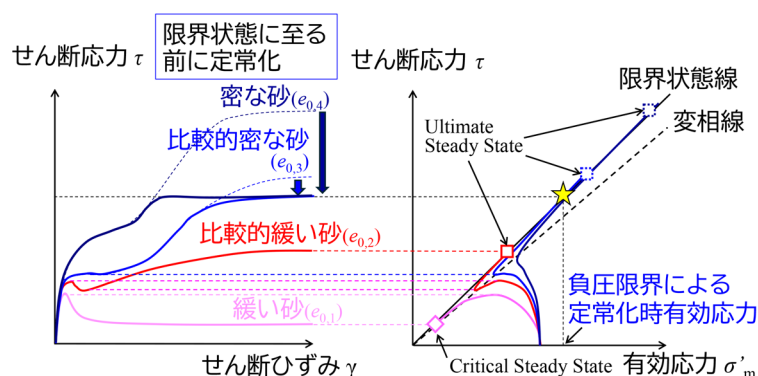


図3 定常化に至るまでの土の挙動（負圧限界考慮）

表1 非排水単調せん断試験の条件

試料	豊浦砂				
相対密度 D_r (%)	10	40	60	80	90
初期有効拘束圧 σ'_c (kPa)	50	100	100	100	100
背圧 (kPa)	100	200, 500	200, 500	200	200

置の特性等により間隙水圧 u がゲージ圧で約 -101kPa まで低下せず、ゲージ圧で $-40 \sim -80\text{kPa}$ 程度までの低下でとどまることが多いようである。

このように間隙水圧が底打ちすることによって定常化挙動に至る現象を、本報告では「負圧限界による定常化」と呼ぶ。高い有効応力・せん断応力で限界状態に至るような地盤条件では、負圧限界を考慮すると、図3のように低い応力レベルで負圧限界によって定常化に至ることが考えられる。したがって、実地盤において定常化に至る条件を正確に評価するためには、水圧の条件も踏まえた上で定常化要因について判断することが必要である。

3. 室内試験による定常化挙動の把握

前章では砂の定常化が発生する原理について述べた。本章では、室内土質試験により当該現象について確認した結果について説明する。本研究では、定常化現象を確認するための非排水単調せん断試験、砂が定常状態に至ると考えられる限界状態線を求めるための三軸等方圧密試験⁵⁾、および地盤応答解析と要素試験を連動させることで地盤の地震時挙動を精緻に再現できるハイブリッド地盤応答試験^{4) 6)}を実施した。

3.1 非排水単調せん断試験

砂の定常化現象を確認するため、中空ねじり試験装置を用いて、大ひずみレベルまでの豊浦砂の非排水単調せ

ん断試験を実施した。試験の条件を表1に示す。限界状態・負圧限界という2つのメカニズムによる定常化挙動を確認するため、一部の相対密度の供試体について、背圧を変更した複数の試験を実施している。ここで、背圧は実地盤内における初期の間隙水圧の値に相当するものであるが、一般的な背圧条件（ $\sim 200\text{kPa}$ 程度）では限界状態に至る前に負圧限界による定常化に達したことから、限界状態による定常化挙動を確認するために 500kPa という非常に高い背圧条件を設定した試験も実施した。

試験から得られたせん断応力－せん断ひずみ関係、有効応力経路、および間隙水圧－せん断ひずみ関係のうち、代表的なものを図4に示す。 $D_r=40$ 、60% 背圧 200kPa のケースでは、密度が異なるにもかかわらず、ほぼ同じ有効応力 340kPa 程度で定常化に至っていることが分かる。点線で示した背圧 500kPa のケースでは、同密度でもより大きな有効応力まで達していることから、背圧 200kPa の各ケースでは負圧限界により定常状態に至っていると判断できる。また、それよりも背圧が 300kPa 大きい $D_r=60\%$ 、背圧 500kPa のケースでは、定常化時の有効応力も $+300\text{kPa}$ された 640kPa 程度であり、このケースでも負圧限界による定常化が発生したと考えられる。これらのケースについて間隙水圧－せん断ひずみ関係を見ると、いずれも間隙水圧が -40kPa 程度で底打ちしている。このことから、今回使用した中空ねじり試験装置においては、負圧の発生限界が -40kPa 程度であっ

たことが想定される。なお、 $D_r=80\%$ および 90% のケースでも同様に負圧限界による定常化が観察された。

一方で、赤点線で示した $D_r=40\%$ 、背圧 500kPa のケースでは全応力 $+40\text{kPa}$ よりも低い有効応力、および -40kPa よりも高い間隙水圧状態で定常化が発生しており、土の限界状態 (Ultimate Steady State) により定常化に至ったと考えられる。また、 $D_r=10\%$ のケースでは、有効応力が減少し続けて定常化に至っており、同様に土の限界状態 (Critical Steady State) により定常化に至ったと言える。なお、 $D_r=40\%$ および 60% のケースで、背圧条件により定常化以前の挙動にも差異が見られるが、原因は未解明で、今後の検討課題である。

3.2 三軸等方圧密試験

限界状態線が一般に正規圧密線と平行である⁸⁾ ことを利用し、本研究では三軸等方圧密試験により正規圧密線を求め、この結果から限界状態線を求める。試験条件を表2に示すが、三軸試験装置を用いて $20\sim 3,000\text{kPa}$ までの幅広い応力範囲で等方圧密を行った。

試験結果を図5に示す。ここで、破線で示す圧密・膨潤線は、 $20\rightarrow 1,000\text{kPa}$ (载荷)、 $1,000\rightarrow 3,000\text{kPa}$ (载荷)、 $3,000\rightarrow 100\text{kPa}$ (除荷) で得られたプロットに対してそれぞれ最小二乗法を適用したものである。圧密応力 $1,000\text{kPa}$ 程度までは膨潤曲線と同等の傾き C_s で圧縮しているのに対し、それ以上の応力レベルにおいて傾きが急になり、正規圧密線 (傾き C_c) に相当する関係が得られた。

この圧密試験結果と、前節の単調せん断試験における定常化時点の有効応力と間隙比を図6にプロットする。

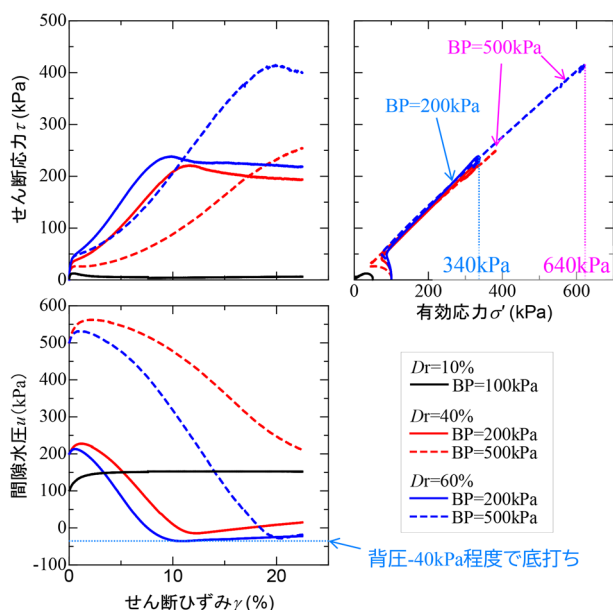


図4 非排水単調せん断試験結果

単調せん断試験において、土の限界状態で定常化に至ったと考えられる「 $D_r=40\%$ 、背圧 500kPa 」および「 $D_r=10\%$ 、背圧 100kPa 」の定常化時点を通る直線は、等方圧密試験で求めた正規圧密線とほぼ平行であり、これが豊浦砂の限界状態線と考えられる。このことから、実際に限界状態線を求める際には、等方圧密試験と、限界状態で定常化に至りやすい低密度条件での非排水単調せん断試験1ケースを実施すれば良いと言える。その他のケース ($D_r=80\%$ および 90% のケースを含む) はいずれも限界状態線より下側にプロットされており、背圧 200kPa のケースでは有効応力約 340kPa で、背圧 500kPa のケースでは有効応力約 640kPa で定常化に至っている (初期全応力 $+40\text{kPa}$ 程度)。砂の初期密度等によらず、背圧条件のみで定常化時有効応力が決まっていることから、これらのケースにおいて負圧限界により定常化が発生していることが確認できる。

3.3 ハイブリッド地盤応答試験

成層地盤内における飽和砂層の地震時挙動、および定常化現象を確認するため、ハイブリッド地盤応答試験⁴⁾ を実施した。この装置は、1次元地盤応答解析において検討対象とする層を単調せん断の土質試験 (静的载荷) に置き換えることで、精緻な地盤応答を算定することが

表2 三軸等方圧密試験の条件

供試体	豊浦砂 50×100mm 円筒供試体
初期相対密度	$D_r = 19.6\%$
初期応力条件	有効拘束圧 20 kPa 背圧 200 kPa
载荷	$20 \rightarrow 3,000\text{ kPa}$ (11 段階)
除荷	$3,000 \rightarrow 100\text{ kPa}$ (5 段階)

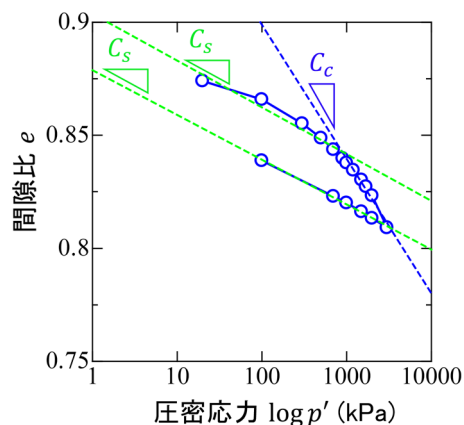


図5 豊浦砂の三軸等方圧密試験結果

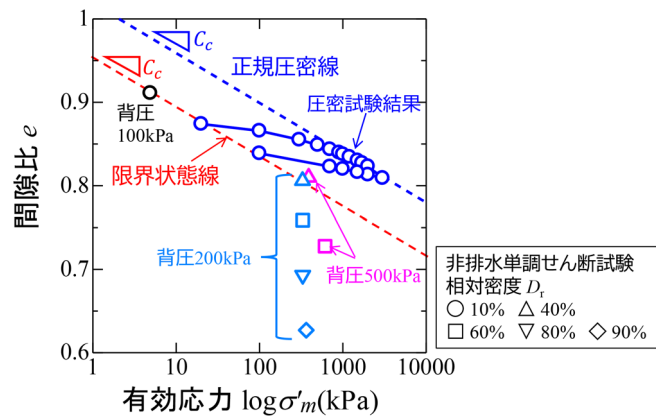


図6 豊浦砂の限界状態に関する $e-\log \sigma'_m$ 関係

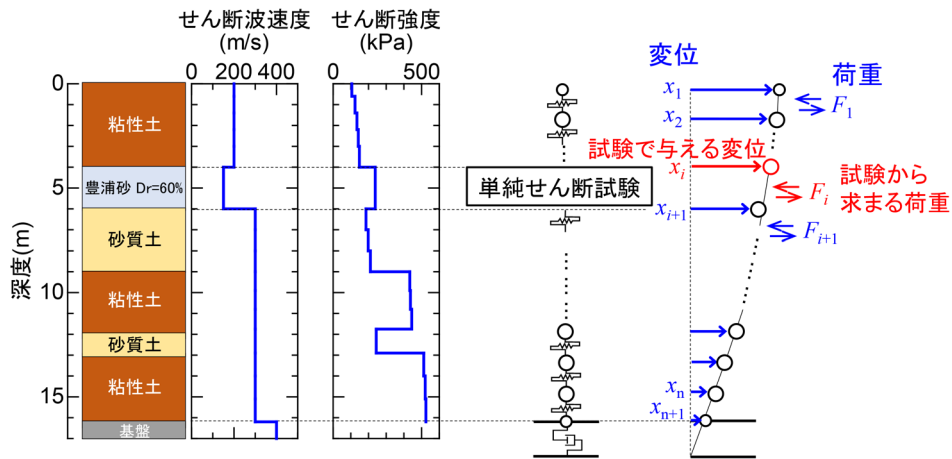


図7 ハイブリッド地盤応答試験地盤モデル

可能な装置である。

試験では図7に示す地盤を対象とした。深度4～6mに存在する砂層を豊浦砂 $D_r=60\%$ を用いた土質試験で置換し、その他の層についてはGHE-Sモデルを適用した全応力解析とし、標準パラメータを用いてモデル化した。地下水位が地表面にあるとすると、深度5m位置での静水圧は約50kPaであるが、背圧を50kPa、200kPaに設定することで、異なる負圧限界となる2ケースを実施した。ただし、背圧は異なるが、セル圧を調整することで、いずれのケースでも初期平均有効応力は20kPaに設定した。予備試験の結果から、本装置の負圧の下限値は-80kPa程度であることを確認しており、各ケースの負圧限界による定常化時有効応力は①150kPaおよび②300kPa程度と推測される。図6より、豊浦砂 $D_r=60\%$ では砂の限界状態による定常化時有効応力は1,000kPaを超えるため、いずれのケースも負圧限界によって定常化が発生すると推測される。

巨大地震時の定常化を含む地盤挙動を確認するため、入力地震動は、耐震標準記載のL2地震動スペクトルⅡ

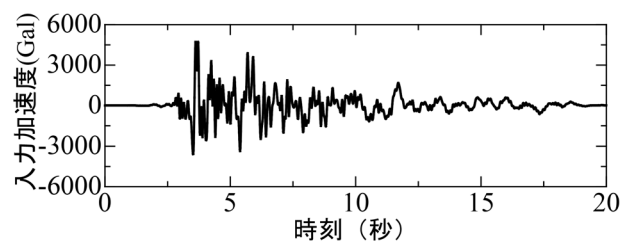
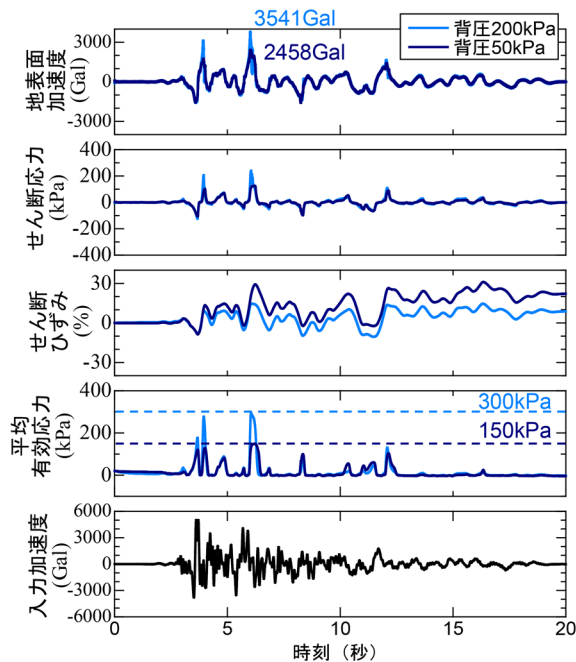


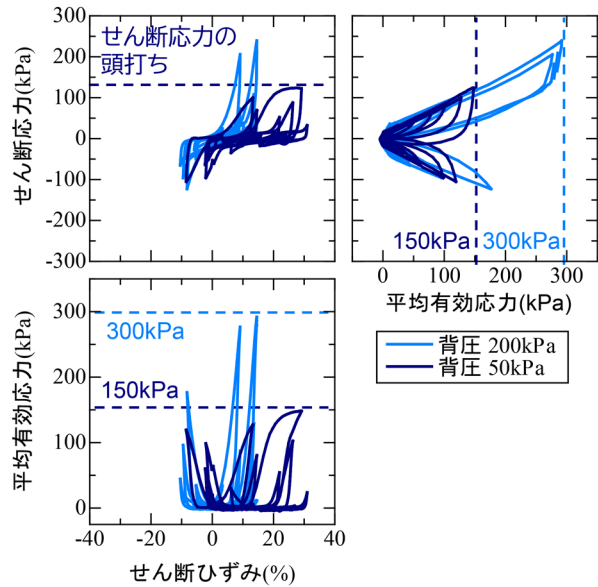
図8 入力地震動

(G1地盤)の振幅最大値を5,000Galに調整したもの(図8)を、基盤に粘性境界 ($\rho=2.0\text{g/cm}^3$, $V_s=400\text{m/s}$) を介して入力した。減衰としてレーリー減衰 ($\alpha=3.78$, $\beta=4.53 \times 10^{-4}$) を適用した。

図9(a)に地表面の応答加速度および土質試験対象層の応力、ひずみを示す。背圧50kPaのケース①では、6秒付近で有効応力が負圧限界による定常化時有効応力150kPaに達し、有効応力およびせん断応力が頭打ちしていることが分かる。一方、背圧200kPaのケース②では負圧限界による定常化時有効応力300kPaに対して有



(a) 時刻歴



(b) ハイブリッド対象層履歴曲線

図9 ハイブリッド地盤応答試験結果

効応力が290kPa程度まで増加しているものの、定常化までは至っていない。この時点での地表面応答加速度はそれぞれ①2,458Gal、②3,541Galとなっており、背圧条件によって最大の応答加速度にも差異が生じていることが分かる。また、せん断ひずみも背圧200kPaのケース②では背圧50kPaのケース①の半分程度となっている。図9(b)にハイブリッド対象層のせん断応力-せん断ひずみ関係および有効応力経路を示す。背圧50kPaのケース①で定常化が発生し、せん断応力が頭打ちし、応力一定の状態でせん断ひずみが増加している挙動が確認できる。

以上の結果より、定常化が発生しうる巨大地震に対する地盤の応答評価では、間隙水圧条件を適切に考慮する必要があることが分かる。また、このような挙動を適切に解析によって再現するためには、定常化時有効応力を適切に設定した動的解析を実施する必要があると考えられる。

4. 有効応力解析モデルの検討

前章では、各種試験により砂の大変形時の挙動を確認した。これを踏まえて、本章ではその挙動を評価可能な有効応力解析モデル⁷⁾について述べる。

4.1 既往の有効応力解析モデル

液状化が発生する地盤について動的解析を実施する場

合には、水圧上昇の影響を考慮できる有効応力解析法を用いることが推奨されている。耐震標準¹⁾では、全応力解析モデルとしてGHE-Sモデルを標準としているが、これはサイクリックモビリティに起因して大ひずみ領域のせん断応力-せん断ひずみ関係が逆S字型を示し履歴減衰が低下する現象を全応力解析において考慮可能とするために、GHEモデルを改良したものである。有効応力解析では同様の現象を自動的に考慮可能であることから、GHEモデルに水圧を評価するダイレイタンシーモデルであるおわんモデル⁹⁾を組み合わせることで、有効応力解析を実施することとしている。

おわんモデルは土のせん断に伴うダイレイタンシー ε_v^s を、圧縮成分と膨張成分の和の形(式(2))で表現するモデルであり(図10)非排水条件(式(3))を課すことで水圧の発生をモデル化することが可能である。

$$\varepsilon_v^s = A \cdot \Gamma^B + \frac{G^*}{C + D \cdot G^*} \quad (2)$$

$$d\sigma'_m = \frac{-\sigma'_m \cdot d\varepsilon_v^s}{0.434(C_s \text{ または } C'_s)/(1+e_0)} \quad (3)$$

ここに、 Γ : 合せん断ひずみ、 G^* : 累加せん断ひずみ、 A 、 B 、 C 、 D 、 $C_s/(1+e_0)$ 、 $C'_s/(1+e_0)$: おわんモデルパラメータ

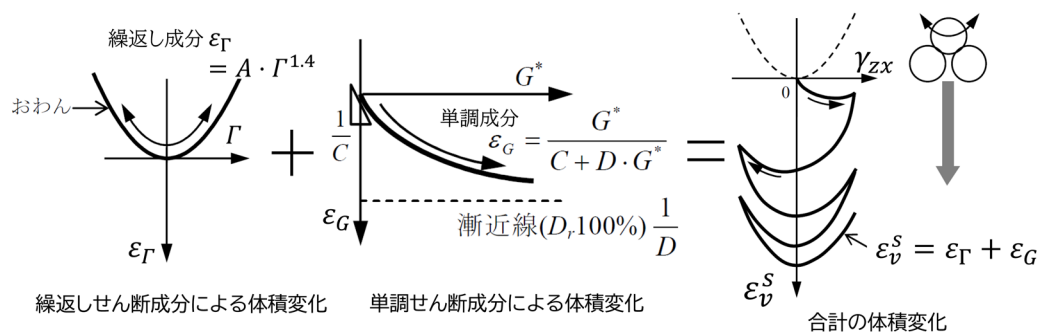


図 10 おわんモデルの概念図⁹⁾に加筆

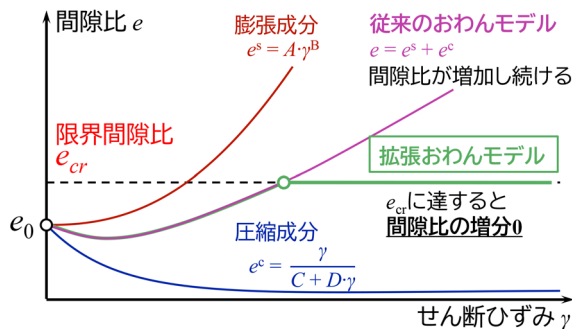


図 11 拡張おわんモデルの概念図

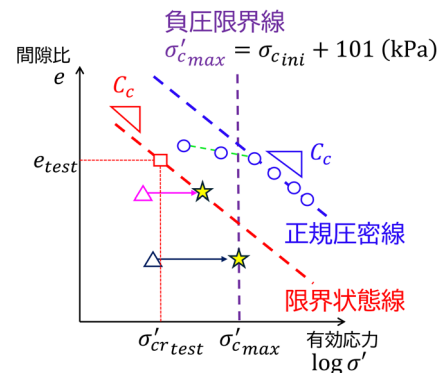


図 12 定常化時有効応力設定の概念図

4.2 拡張おわんモデル

4.2.1 定常状態のモデル化

従来のおわんモデルでは、ひずみの増加に伴い、膨張成分 $A \cdot \Gamma^B$ が増加し続けるため定常化を考慮できず、大変形時に有効応力を過大に評価してしまう可能性がある。そこで、砂が定常化する時点での間隙比である限界間隙比 e_{cr} に達した場合におわんが平行移動し、間隙比の増分を 0 とすることで定常化の考慮を可能とした拡張おわんモデルを構築した (図 11)。これにより、大ひずみ領域でのせん断応力や応答加速度を過大評価せずに適切に計算でき、巨大地震に対する液状化地盤の応答を精緻に再現できると考えられる。

加えて、3 章で実施した試験結果等を踏まえ、負圧限界による定常化を考慮できるようにするため、排水条件での限界間隙比 e_{cr} と非排水条件での定常化時有効応力 σ'_{cr} が対応する (図 1 および式 (3)) ことを利用して、定常化の閾値として e_{cr} の代わりに、 σ'_{cr} を直接指定することが出来るようにモデルの改良を行った。これにより、有効応力が σ'_{cr} に達した場合には、それ以上有効応力が増加しないまません断ひずみが増加していく挙動を再現可能とした。

4.2.2 定常化時有効応力の設定

拡張おわんモデルで計算を実施する場合、従来のおわんモデルのパラメータに加えて、定常化を規定するパラメータとして限界間隙比 e_{cr} または定常化時有効応力 σ'_{cr}

を設定する必要がある。ここでは前章の試験結果に基づき、定常化時有効応力 σ'_{cr} の設定方法について述べる。

まず、高压状態に至るまでの三軸等方圧密試験を実施し、対象とする土質の正規圧密線 (図 12 青点線) を求める。次に、土の限界状態で定常化に至る低密度条件 (Critical Steady State に至る) において非排水単調せん断試験を実施し、定常化に至った際の有効応力および間隙比を求める。これらの 2 試験から、対象とする土質の限界状態線を求めることができる (図 12 赤点線)。一方で、解析対象とする深度での静水圧の値から、負圧限界で定常化に至る際の定常化時有効応力 (負圧限界線) (図 12 紫点線) を求めることができる。

(図 12 紫点線) を求めることができる。 e - $\log \sigma'$ 上で、解析対象とする密度、初期有効応力条件 (例えば図 12 三角印) から開始し、定体積でせん断 (間隙比 e 一定で移動) したとき、限界状態線および負圧限界線のうち先に到達する点 (例えば図 12 星印) において定常化が発生し、その時の有効応力値を定常化時有効応力の値と考えることができる。拡張おわんモデルによる有効応力解析を実施する際には、各層 (各要素) の初期応力状態に対して上記の手順で σ'_{cr} を設定することで、定常化を考慮した動的解析を実施できる。

4.3 室内試験の再現解析

4.3.1 パラメータ設定と液状化強度試験の再現解析

拡張おわんモデルを用いて、豊浦砂 $D_r=60\%$ の土質を対象として実施した中空ねじりせん断試験装置を用いた非排水繰返しせん断試験（以降、液状化強度試験）の再現解析を実施した。別途実施した変形特性試験や液状化強度試験から設定したパラメータを表3に示す（(b) (c) のパラメータの意味については文献^{1) 9)}を参照されたい）。なお、おわんパラメータとして示した $C_s/(1+e_0)$ および $C'_s/(1+e_0)$ はひずみの発展に関する調整パラメータであり、圧密試験時の圧縮指数と一致するものではない。表3のパラメータを用いた液状化強度試験の要素シミュレーション結果を図13に示すが、液状化強度試験から得られた液状化強度曲線（ $\gamma_{DA}=7.5\%$ に至る繰返し回数とせん断応力比の関係）を概ね再現できているといえる。定常化時有効応力は $\sigma'_{cr}=150\text{kPa}$ としているが、これはハイブリッド地盤応答試験を再現するため、初期全応力 70kPa と当該装置の負圧限界である

-80kPa の差分に合わせて設定したものである。

4.3.2 非排水三回繰返し試験

ハイブリッド地盤応答試験で使用している単純せん断試験装置を用いて、 $\pm 20\%$ の大ひずみ領域での3回繰返し試験を拡張おわんモデルを用いて再現した。せん断ひずみとせん断応力、平均有効応力の関係を図14に示す。なお、試験は豊浦砂 $D_r=60\%$ 供試体を用い、初期有効拘束圧 20kPa 、背圧 200kPa の条件で実施した。

拡張おわんモデルを適用した有効応力解析（試験条件より、定常化時有効応力を 320kPa に設定）では、大ひずみ領域で平均有効応力が約 320kPa 、せん断応力が約 230kPa で頭打ちしており、試験において発生している定常化挙動を再現している。ただし、ひずみが小さい領域でのループ形状に関しては試験結果と差異が生じる結果となっている。

4.3.3 ハイブリッド地盤応答試験

背圧 50kPa で実施したハイブリッド地盤応答試験の再現解析結果を、拡張おわんモデル（定常状態を考慮）

表3 豊浦砂 $D_r=60\%$ の解析パラメータ

(a) 土の強度等に係る諸元

初期せん断剛性 $G_{0i}(\text{kPa})$	規準ひずみ $\gamma_{ri}(\%)$	内部摩擦角 $\phi'(^{\circ})$	粘着力 $c(\text{kPa})$
9820	0.00732	35.7	0

(b) GHE パラメータ

$C_1(0)$	$C_1(\infty)$	$C_2(0)$	$C_2(\infty)$	α	β	$h_{\max}$	κ
1.00	0.265	0.424	1.00	1.32	0.97	0.36	1.1

(c) おわんパラメータ

A	B	C	D	$C_s/(1+e_0)$	$C'_s/(1+e_0)$	X_1	$\sigma'_{cr}(\text{kPa})$
-0.5	1.4	10.0	30.0	0.01	0.0102	0.15	150

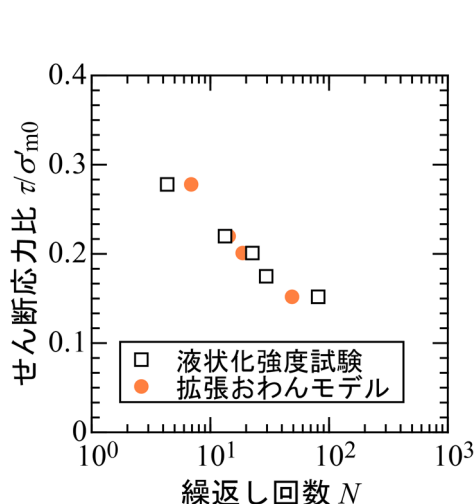


図13 液状化試験の再現結果

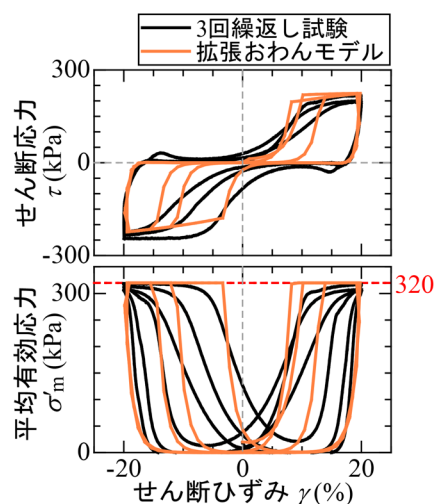


図14 3回繰返し試験の再現解析

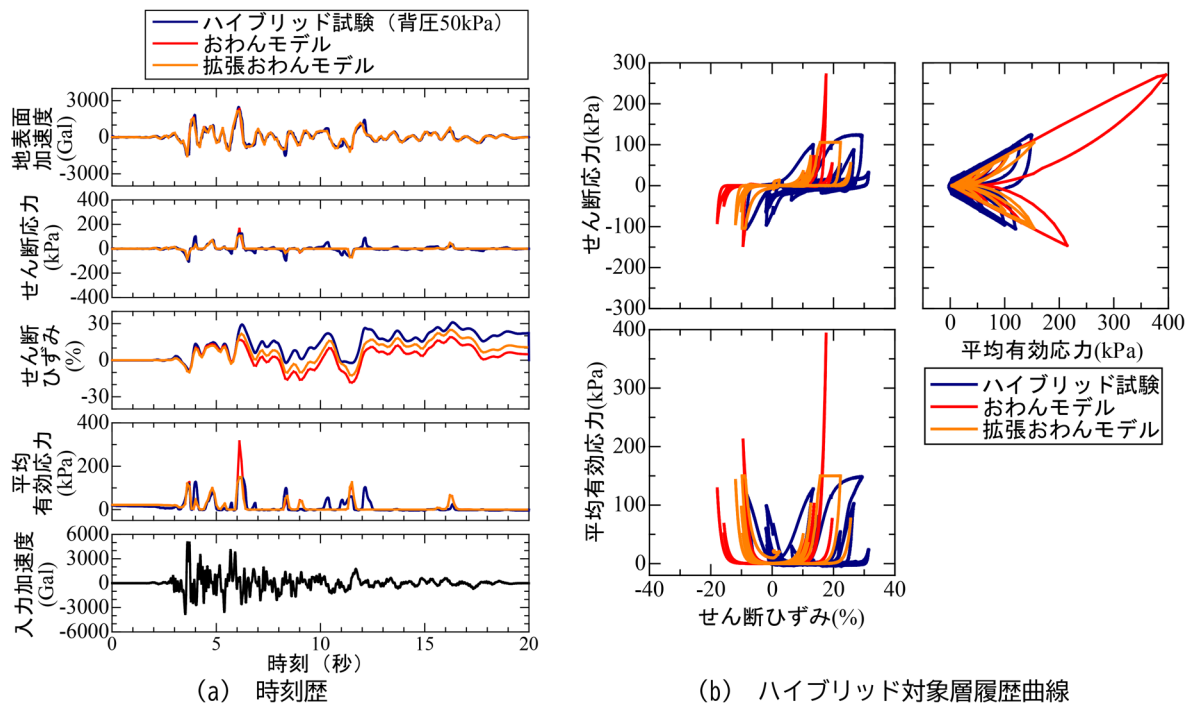


図 15 ハイブリッド地盤応答試験の再現解析（背圧 50kPa）

および従来のおわんモデル（定常状態を考慮しない）の結果とともに図 15 に示す。

図 15 (a) に示した時刻歴を見ると、従来のおわんモデルでは、例えば 6 秒付近で平均有効応力が 300kPa 程度、せん断応力が 250kPa 程度まで上昇するなど、応力レベルの頭打ちが再現できず、その結果地表面応答加速度を最大 3,000Gal 程度と過大評価する傾向にある。一方、拡張おわんモデルでは、平均有効応力が約 150kPa で頭打ちするハイブリッド試験の挙動を再現できており、せん断応力や加速度応答時刻歴における頭打ち挙動も試験結果と同様となっている。図 15 (b) に示した履歴曲線でも、従来のおわんモデルでは応力レベルを過大評価し、最大ひずみレベルも試験結果より小さくなっているのに対し、拡張おわんモデルを用いた場合には、試験結果と概ね整合する履歴曲線および応力・ひずみの最大値が得られていることが分かる。以上より、拡張おわんモデルを使用することで、地盤の定常化挙動を考慮し、実際の地盤挙動に即した応答解析が可能になることが示された。

5. まとめ

本研究では、砂の大変形時の挙動を実験的に確認し、それを再現可能な有効応力解析モデルを提案した。その結果として、以下が得られた。

(1) 砂が定常化に至る要因として、砂が限界状態に至る

ことのほかに、間隙水圧が負圧限界に至ることがある。負圧限界の存在により、同じ土質、密度の供試体を用いたとしても、背圧が異なる条件では異なる応力レベルで定常化に至ることがある。

(2) ハイブリッド地盤応答試験装置を用いた、巨大地震を想定した試験から、負圧限界に起因する定常化によって地盤の加速度応答などが影響を受けることを確認した。

(3) 高压に至るまでの等方圧密試験と Critical Steady State を与えるような低密度条件での非排水単調せん断試験から、限界状態線を導出し、定常化時有効応力を推定する方法を提案した。

(4) 上記の定常化挙動を考慮可能な有効応力解析モデルとして拡張おわんモデルを提案した。

(5) 拡張おわんモデルを適用した有効応力解析により、要素試験およびハイブリッド地盤応答試験結果における、応力の頭打ち現象や履歴曲線の形状等を良好に再現できることを確認した。

文 献

- 1) 国土交通省鉄道局監修，鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計，丸善出版，2012
- 2) 防災科学研究所 HP：2024 年 1 月 1 日令和 6 年能登半島地震による強震動，https://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/topics/html/20240101160813/main_20240101160813.html（参照日：2025 年 7 月 2 日）

- 3) M. Yoshimine and K. Ishihara: Flow potential of sand during liquefaction, *Soils and Foundations*, Vol.38, No.3, pp.189-198, 1998.
- 4) 鈴木聡, 井澤淳, 豊岡亮洋, 小島謙一: 耐震設計における適切な表層地盤応答評価法の構築, 鉄道総研報告, Vol.32, No.9, pp.11-16, 2018
- 5) 小野寺智哉, 伊吹竜一, 井澤淳, 福武毅芳, 桐山貴俊, 馬淵倉一, 児玉剛: 巨大地震による砂地盤の定常化挙動に関する実験的検討, 第44回地震工学研究発表会, 2024
- 6) 伊吹竜一, 井澤淳, 小野寺智哉, 福武毅芳, 桐山貴俊, 馬淵倉一, 児玉剛: 砂地盤の定常化に与える水圧条件に関するハイブリッド地盤応答試験, 第59回地盤工学研究発表会, 2024
- 7) 山本昌徳, 小野寺智哉, 伊吹竜一, 井澤淳, 福武毅芳, 桐山貴俊, 児玉剛, 馬淵倉一: 定常化を考慮した拡張おわんモデルとそのパラメータ設定法, 第58回地盤工学研究発表会, 2023
- 8) A.N. Schofield and C.P. Wroth: *Critical State Soil Mechanics*, McGraw-Hill Inc., 1968.
- 9) 福武毅芳: 三次元有効応力解析プログラム HiPER (おわんモデル) と液状化シミュレーション, 清水建設研究報告, Vol.96, pp.5-18, 2018

隣接構造物の影響を除いた橋りょう・高架橋単体の固有振動数同定法の妥当性確認

和田 一範* 坂井 公俊*

Validation of Natural Frequency Identification Method for Individual Bridges and Viaducts, Excluding the Effects of Adjacent Structures

Kazunori WADA Kimitoshi SAKAI

The natural frequency of railway bridges and viaduct groups is used as an integrity assessment index for substructures. However, this may include the effects of vibrations of adjacent structures, and there is a possibility that the vibration characteristics cannot always be evaluated clearly. From this reason, the authors theoretically derived a method for identifying the natural frequency of individual bridges and viaducts, using the natural frequency and natural mode of the entire structure evaluated by microtremor observation. In this paper, we verified the applicability of the proposed method to railway bridges and viaducts by conducting a 3D dynamic analysis based on real structures and measurements. The result showed that the natural frequency of the substructure could be identified with an error of about 10%. Therefore, by identifying the natural frequency of the substructure using the proposed method, it is possible to improve the integrity assessment of structures after an earthquake.

キーワード：構造物単体，固有振動数，同定，鉄道橋りょう・高架橋

1. はじめに

鉄道橋りょう・高架橋は、桁や支承を介して複数の構造物単体が連続した群を構成しているため、振動計測から得られる固有振動数などの振動特性は、隣接構造物の振動の影響を含んだ構造全体系としての値である。これは、道路橋を対象とした橋脚単体と構造全体系の実測比較¹⁾や鉄道構造物群の連成に関する実測および解析的検討²⁾などの研究事例を見ても明らかである。ここで、本稿では橋りょう形式の場合は橋脚～基礎構造物、ラーメン高架橋形式の場合はスラブ～柱～基礎構造物の部分を「構造物単体」と表現する（図1 (a)）。

振動計測で得られる構造全体系の振動特性は、構造物の健全性判断に活用されてきた。特に鉄道分野では、橋りょう・高架橋において健全性を評価したい構造物に衝撃加振を行い、得られる波形から構造全体系の固有振動数を評価して、基礎構造物の健全性を評価する衝撃振動試験^{3) 4)}が長年に亘り活用されている。構造物単体の損傷や安定性の低下は、構造全体系の固有振動数の低下を招くため、本手法は有効な非破壊検査法の1つといえる。その一方で、隣接する構造物の振動特性が大きく異なるような場合は、構造物間の連成の影響が支配的となり、局所的な構造物単体の損傷が構造全体系の固有振動

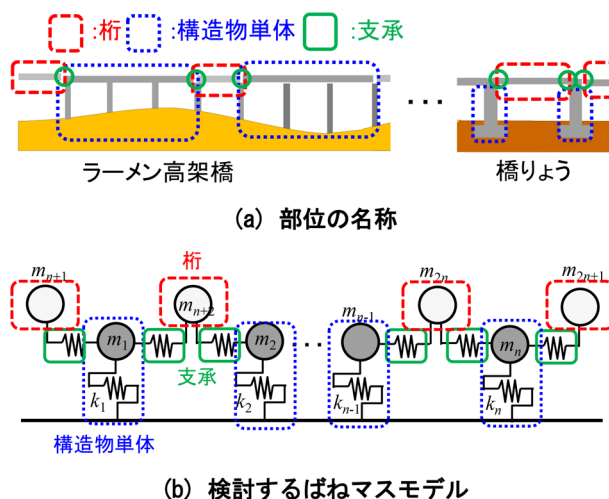


図1 対象とする鉄道橋りょう・高架橋のイメージ

数の変化に与える影響が限定的となり、構造物単体の特性を明瞭に評価できない場合も考えられる。上記背景を踏まえ、著者らは桁、支承を介して複数の構造物単体が連続した橋りょう・高架橋群をばねマスモデルで表現し（図1）、構造全体系の固有振動数や固有モードから構造物単体の固有振動数を同定する手法を理論的に導出している^{5) 6)}。本手法が確立すれば、例えば地震や河川橋脚における洗掘等で基礎構造物の健全性低下が疑われる場合に、構造物単体の固有振動数を新たな健全度判定の

* 鉄道地震工学研究センター 地震応答制御研究室

指標に用いることで、衝撃振動試験の判定指標（全体系の1次固有振動数）よりも直接的かつ正確に基礎構造物の健全度を判断できる可能性がある。

既往研究^{5) 6)}では図1(b)に示すばねマスモデルを対象に提案手法の妥当性確認を行っているが、橋軸方向に多数の自由度を持つ実際の桁やラーメン高架橋の挙動を想定した手法の妥当性確認は十分には行われていない。また、提案手法で必要な構造全体系のモーダルパラメータ（固有振動数、固有モード）は、鉄道橋りょう・高架橋群の複数点にセンサを配置した地震観測や微動観測等を行い、得られた応答波形に対してFDD（Frequency Domain Decomposition）法⁷⁾等を適用することで算定できると考えられるが、そのような実測および実構造を想定した検討は行われていない。

そこで、著者らは実構造での提案手法の適用性を検証する前の基礎的検討として、実構造での実測を想定した条件下における提案手法の妥当性を解析的に確認している⁸⁾。本稿では、鉄道橋りょう・高架橋群の3次元骨組モデルに微動を想定したホワイトノイズを入力した動的解析を実施し、そこで得られる応答波形にFDD法⁷⁾を適用して、提案手法によって構造物単体の固有振動数を同定した内容⁸⁾について紹介する。

2. 構造物単体の固有振動数同定法の概要

本章では、文献^{5) 6)}で提案した固有振動数同定法の概要を述べる。提案手法は下記前提条件のもと行っている。

- ・橋りょう・高架橋群は弾性挙動をする
- ・剛性の振動数依存性は考慮しない
- ・減衰はRayleigh減衰等の比例減衰型の特性とする

図1(b)に示す構造物単体 n 基のばねマスモデルの減衰自由振動問題を考える。この問題の運動方程式は下記となる。

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{X}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{X}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{X}(t) = \mathbf{0} \quad (1)$$

ここで、 $\mathbf{M}$ は質量行列、 $\mathbf{C}$ は減衰行列、 $\mathbf{K}$ は剛性行列を表し、 $\mathbf{X}(t)$ は各質点の変位ベクトルである。上式の解として調和振動解を仮定すると、 $\mathbf{X}(t)$ は下記の形で表せる。

$$\mathbf{X}(t) = \{r_1 \ r_2 \ \cdots \ r_{2n+1}\}^T e^{\lambda t \pm j\phi}, \lambda = -\sigma \pm j\omega_D \quad (2)$$

ここで j は虚数単位である。また、 λ は固有値であり、構造全体系の減衰固有円振動数 ω_D とモード減衰定数 σ で表される。また、 $r_1 \sim r_{2n+1}$ は各変位振幅、 ϕ は位相角である。式(1)に式(2)を代入して、整理すると下式が得られる。

$$\sum_{i=1}^n (\lambda C_i + \Omega_i^2) M_i R_i = -\lambda^2 \sum_{i=1}^{2n+1} M_i R_i \quad (3)$$

ここで、 l を着目する構造物単体の添え字として、

$$C_i = \frac{c_i}{m_i}, \Omega_i^2 = \frac{k_i}{m_i}, M_i = \frac{m_i}{m_l}, R_i = \frac{r_i}{r_l} \quad (4)$$

と表現している。なお、 Ω_i は構造物単体 i の固有円振動数に相当する。式(3)について式(2)で表される λ を代入すると複素数の方程式が得られるが、その方程式が成立するための条件である実部＝虚部＝0の条件を適用すると j 次モードに関して次式が成り立つ。

$$\sum_{i=1}^n \Omega_i^2 M_i R_{ji} = \omega_j^2 \sum_{i=1}^{2n+1} M_i R_{ji} \quad (5)$$

なお、上式の整理においては j 次の減衰固有円振動数 ω_{Dj} およびモード減衰定数 σ_j に関して、非減衰固有円振動数 ω_j と減衰定数 h_j を用いた次式の変換を適用している。

$$\sigma_j = h_j \omega_j, \omega_{Dj} = \omega_j \sqrt{1 - h_j^2} \quad (6)$$

式(5)を見ると、未知数は $\Omega_i (i=1, 2, \dots, n)$ の n 個であり、質量比 M_i は設計図書等から算定することができる。そのため、 n 組の非減衰固有円振動数 ω_j と固有モード R_{ji} を何らかの方法で評価できれば構造物単体 i の固有円振動数 Ω_i を求めることができる。なお、通常想定される橋りょう・高架橋の減衰定数（数%）であれば、非減衰固有円振動数は減衰固有円振動数に置き換えても同定精度への影響が小さいことを別途確認している⁵⁾。

3. 実構造物を想定した提案手法の妥当性確認

本章では、実構造物での微動観測を想定した条件下における提案手法の妥当性を解析的に確認する。まず解析モデルおよび動的解析の概要について、実構造物および実測との対応関係を踏まえながら述べる。続いて、解析結果を実測データと捉え、FDD法⁷⁾を用いることで、提案手法を適用するために必要なモーダルパラメータを評価する。最後に、提案手法を用いて構造物単体の固有振動数を同定するとともに、正解値との比較を行う。

3.1 解析モデルの概要

妥当性確認に用いる鉄道橋りょう・高架橋群の3次元骨組モデルを図2に示す。直接基礎形式のラーメン高架橋3連（R1～R3）と橋脚1基（P1）、調整桁3連（Ct1～Ct3）から構成される群を対象とした。今回の解析モ

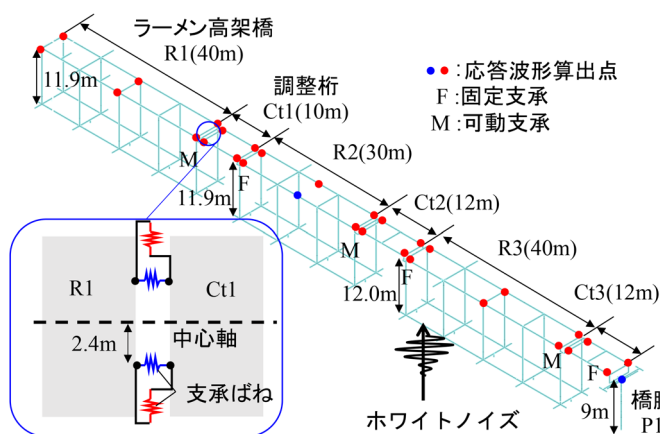


図2 実測を想定した骨組モデルでの解析

表1 構造物諸元一覧

部位	寸法, 剛性
ラーメン柱 (L*C)	0.9m×0.9m
上層縦梁 (幅*厚さ)	0.8m×1.3m
上層横梁 (幅*厚さ)	1.0m×1.4m
地中縦梁 (幅*厚さ)	0.6m×1.4m
地中横梁 (幅*厚さ)	3.0m×1.4m
調整桁 (幅*厚さ)	1.4m×1.0m
橋脚柱 (L*C*H)	1.9m×4.5m×7.0m
橋脚梁 (L*C*H)	1.9m×9.2m×2.2m
橋脚フーチング (L*C*H)	6.5m×8.0m×1.9m
固定支承剛性	1.0×10^8 kN/m
可動支承剛性	6.1×10^3 kN/m

表2 各構造の重量一覧

構造物	R1	R2	R3	P1	Ct1	Ct2	Ct3
重量(kN)	9287	6875	9287	1382	1666	2002	2125

表3 橋りょう・高架橋群の固有値解析結果の一覧

次数	固有振動数(Hz)	刺激係数			有効質量比			備考
		橋軸	橋軸直角	鉛直	橋軸	橋軸直角	鉛直	
1	1.71	0.00	1.39	0.00	0.00	0.48	0.00	橋軸直角1次
2	1.76	0.03	-0.38	0.00	0.00	0.02	0.00	
3	1.79	0.01	0.87	0.00	0.00	0.16	0.00	橋軸直角2次
4	1.85	1.24	0.00	0.00	0.61	0.00	0.00	橋軸1次
5	1.99	0.28	-0.01	0.00	0.05	0.00	0.00	橋軸2次
6	2.05	-0.01	0.74	0.00	0.00	0.04	0.00	橋軸直角3次
7	2.14	0.35	0.01	0.00	0.04	0.00	0.00	橋軸3次
8	2.93	0.96	0.01	0.05	0.07	0.00	0.00	橋軸4次
9	4.66	-0.01	1.19	0.01	0.00	0.07	0.00	橋軸直角4次
10	5.76	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	

デルでは便宜的にR1起点側およびP1終点側の桁の影響は考慮していないが、集中質量として考慮することも可能である。柱、梁、橋脚、桁などは全て線形の梁要素でモデル化し、地盤抵抗および支承部の橋軸方向、橋軸直角方向の抵抗は線形のばね要素でモデル化した。ここで、地盤抵抗は「鉄道構造物等設計標準・同解説（基礎構造物）」⁹⁾に基づき、せん断弾性波速度400m/sの砂礫として算定した。また、可動支承の剛性は一般的なゴム支承のせん断剛性より設定し、固定支承の剛性は十分大きな値とした。なお、実構造物は軌道構造（レールや軌道スラブ）やストッパーの拘束の影響が含まれているが、本解析モデルではその影響は考慮していない。

本モデルの各構造諸元については、表1、表2に示す

通りである。また、固有値解析により得られる構造全体系の固有振動数、刺激係数、有効質量比を表3に示す。表中には刺激係数から判断した橋軸方向、橋軸直角方向のモード次数も併せて表記している。このようなモデルについて、各構造物単体の固有振動数（式(4)の Ω_i を 2π で除したものの）の同定を試みる。

各構造物単体の固有振動数の正解値は、図2のモデルの桁および支承を除いた個々のモデルを構築し、固有値解析を実施することで算出した。一例としてラーメン高架橋R1の単体モデルを図3に示すとともに、固有値解析の結果を表4、橋軸方向および橋軸直角方向の1次モードを図4に示す。これらの図表より、単体モデルでは橋軸方向、橋軸直角方向それぞれで刺激係数、有効質

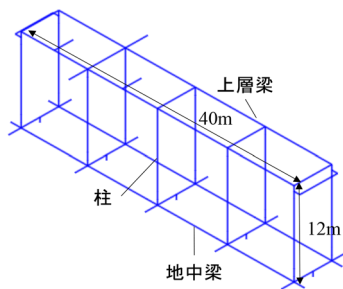
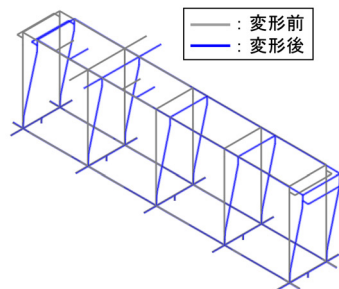
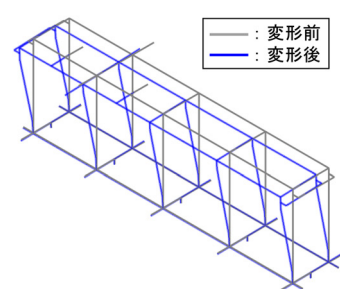


図3 ラーメン高架橋 R1 の3次元骨組モデル



(a) 橋軸方向1次



(b) 橋軸直角方向1次

図4 ラーメン高架橋 R1 (3次元骨組モデル) の固有モード

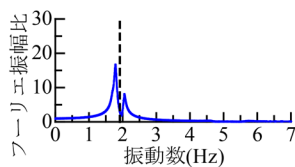
表4 ラーメン高架橋 R1 (3次元骨組モデル) の固有値解析結果の一覧

次数	固有振動数(Hz)	刺激係数			有効質量比			備考
		橋軸	橋軸直角	鉛直	橋軸	橋軸直角	鉛直	
1	1.91	0.00	1.05	0.00	0.00	0.73	0.00	橋軸直角1次
2	1.99	1.02	0.00	0.00	0.74	0.00	0.00	橋軸1次
3	2.24	0.04	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	
4	14.16	0.00	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	
5	15.00	0.01	0.00	1.77	0.00	0.00	0.59	鉛直1次

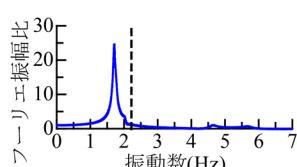
表5 各構造物単体の固有振動数一覧

構造	高架橋 R1		高架橋 R2		高架橋 R3		橋脚 P1	
方向	橋軸直角	橋軸	橋軸直角	橋軸	橋軸直角	橋軸	橋軸直角	橋軸
固有振動数(Hz)	1.91	1.99	2.22	2.29	1.89	1.96	6.46	4.82

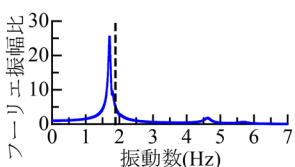
— 応答結果 --- 単体の固有振動数



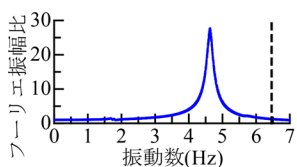
(a) ラーメン高架橋 R1



(b) ラーメン高架橋 R2



(c) ラーメン高架橋 R3



(d) 橋脚 P1

図5 動的解析結果による構造物天端のフーリエ振幅比

量比に有意な値を持つモードが1つだけ存在することがわかる。このモードに対応する固有振動数が提案手法で同定すべき構造物単体の固有振動数とみなすこととした。同様の手順で算定した各構造物単体の橋軸方向および橋軸直角方向の固有振動数を表5に示す。

3.2 動的解析の概要

微動を模擬するために、フーリエ振幅特性が一定のホワイトノイズを入力した動的解析を実施した。入力は、直接基礎の地盤ばねが結合している基盤位置に対して加速度波形として入力した。入力方向は、橋軸直角方向または橋軸方向の2方向とした。

また、応答加速度波形の出力点は図2の赤丸、青丸点

とした。これは、実構造物において、微動計の設置を想定する箇所に対応するが、ラーメン高架橋や調整桁については、後述のように支承部での鉛直方向回りの回転の影響などで橋軸方向に応答が変化するため、起終点端部に微動計を設置する必要があると考え、評価点を設定した。

得られた応答加速度波形について、FDD法⁷⁾を適用することで、構造全体系のモーダルパラメータ(固有振動数、固有モード)を評価するとともに、それらを用いて式(5)より構造物単体の固有振動数を同定する。なお、本モデルは構造物単体が4基あるため、式(5)より必要なモーダルパラメータは4組である。これは表3に示す橋軸方向、橋軸直角方向の1~4次モードに相当する。

動的解析で得られる結果の例を図5に示す。これらの

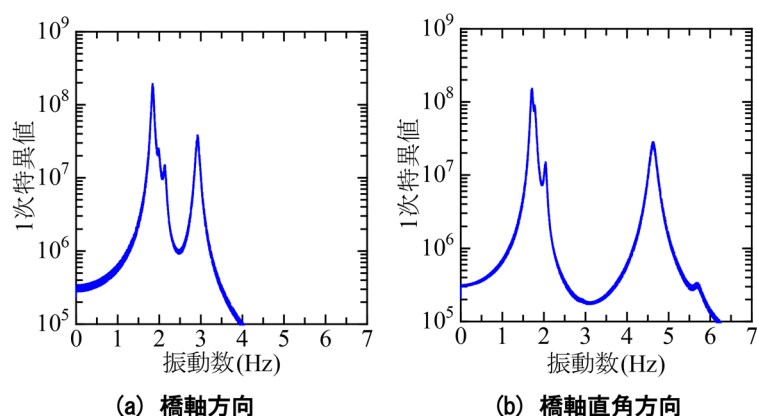


図6 1次特異値分布

図は、橋軸直角方向にホワイトノイズを入力した場合の各ラーメン高架橋中間地点および橋脚天端（図2の青丸点）の加速度のフーリエ振幅比（応答波形のフーリエ振幅/入力波のフーリエ振幅）である。図中では、表5で示された構造物単体の固有振動数に対応した振動数帯を黒点線で示している。本図を見ると、特にR2やP1は単体の固有振動数付近でフーリエ振幅比に明瞭な変化は見られない。これは、R2の起終点にはR2よりも質量が大きいR1、R3が存在すること、P1の起点にはP1よりも質量が大きいR3が存在すること、からR2、P1が特に隣接構造物との連成の影響を強く受けるためと考えられる。このため、応答波形だけを分析しても構造物単体の固有振動数の評価は難しいことがわかる。このような問題に対して、提案手法を用いる妥当性を確認する。

3.3 FDD法を用いたモーダルパラメータの評価

3.2節で述べた動的解析で得られた応答加速度波形にFDD法を適用することにより算定された1次特異値の振動数分布を図6に示す。本図より、各方向において、いくつかピークが確認できる。これらの卓越振動数と、表3で示した構造全体系の橋軸方向、橋軸直角方向の1～4次モードの固有振動数とを比較した結果を図7に示す。本図に示すようにFDD法⁷⁾で算定された振動数が構造全体系の各主要モードの固有振動数と一致していることが確認できる。

また、各卓越振動数において評価された固有モードの例として、橋軸方向および橋軸直角方向の1、2次モードを図8に示す。図中には固有値解析により得られた固有モード形状も併せて示している。本図より、基本的にはFDD法⁷⁾で評価したモード形状は、固有値解析から得られるモード形状と良好に一致していることがわかる。ただし、橋軸直角方向2次モードの橋軸方向80mあたりなどは、両者に多少の乖離が見られる。この理由としては、橋りょう・高架橋群は可動支承部において鉛

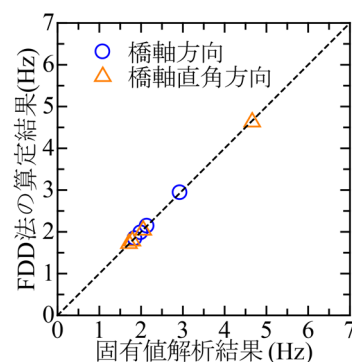


図7 構造全体系の固有振動数評価結果

直軸回りに回転する複雑なモード形状をしているが、その回転の影響が特に大きい箇所であるためと考えられる。

以上より、微動観測を想定した動的解析結果の処理からモーダルパラメータ（固有振動数、固有モード）を概ね評価することができた。

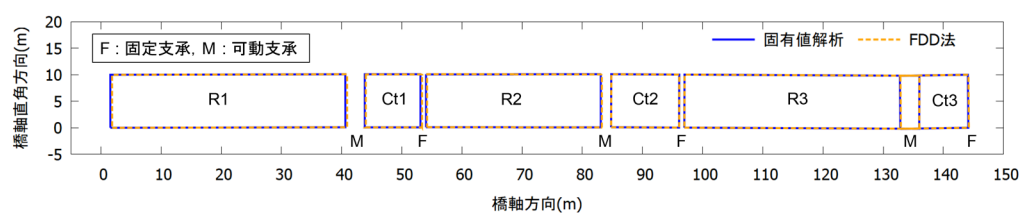
3.4 提案手法による構造物単体の固有振動数同定

FDD法⁷⁾で推定された固有振動数および固有モードから提案手法の式(5)を用いて各構造物単体の固有振動数を同定した結果を図9に示す。図中では、個々の構造物単体の固有値解析を実行した結果を正解値として比較している。本図より、各構造物単体の橋軸方向および橋軸直角方向の固有振動数が1割程度の誤差で推定できていることがわかる。誤差の要因のひとつとしては、図8で述べた固有モードの推定誤差の影響や鉛直軸回りの回転挙動を図1のモデルでは無視している影響と考えられる。

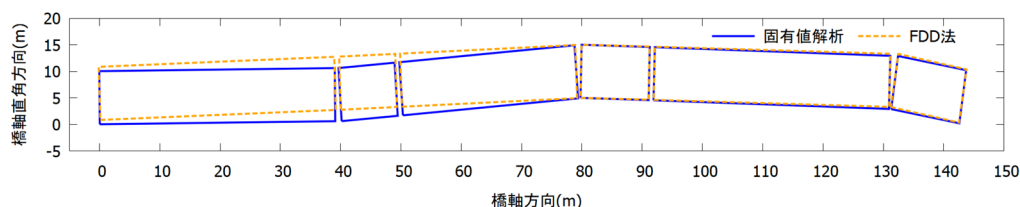
なお、従来の健全度評価手法では、実測で得られる固有振動数が標準的な固有振動数より3割以上小さい場合を最も健全度が低下した状態として判定している³⁾。そのため、本稿で把握した提案手法の誤差（1割）の影響を含めても、提案手法が適用できる可能性は十分あると考えられる。さらに、維持管理を行ううえでは、固有振動数の経時変化を把握することも重要である。その観点においても、上記誤差に関わらず提案手法が適用できると考えられる。

4. まとめ

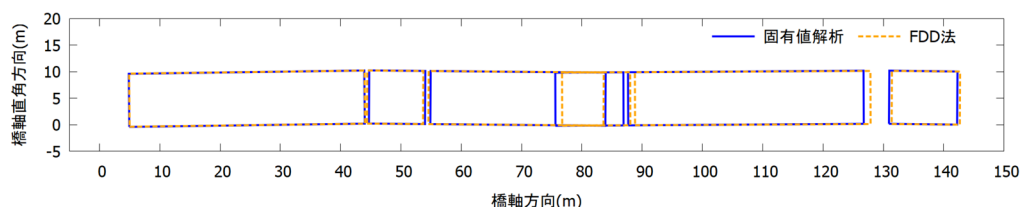
本稿では、直接基礎形式の鉄道橋りょう・高架橋群の3次元骨組モデルに微動を想定したホワイトノイズを入力した線形動的解析を実施し、そこで得られる応答加速度波形にFDD法⁷⁾を適用してモーダルパラメータを評価したうえで、提案手法^{5) 6)}により構造物単体の固有振



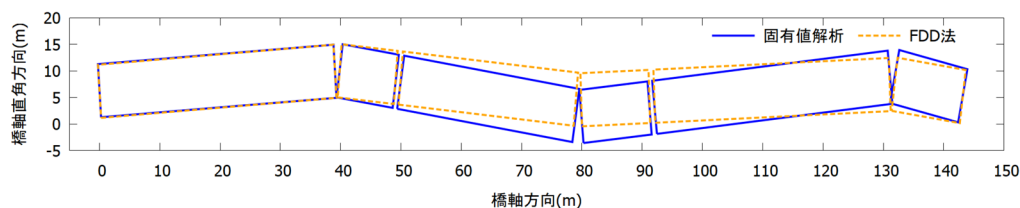
(a) 橋軸方向 1 次モード



(b) 橋軸直角方向 1 次モード



(c) 橋軸方向 2 次モード



(d) 橋軸直角方向 2 次モード

図 8 固有モードの評価結果

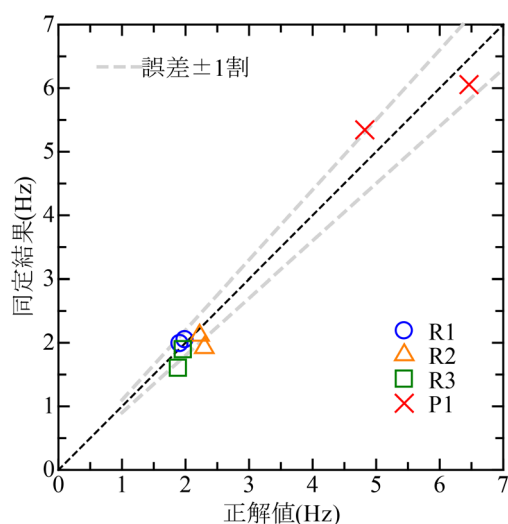


図 9 構造物単体の固有振動数同定結果

動数の同定を試みた。得られた知見を下記に示す。

- ・3次元骨組モデルの動的解析結果にFDD法を適用して評価される固有振動数や固有モードのモーダルパラメータは、固有値解析で評価される正解値を概ね再現できる。
- ・評価されたモーダルパラメータを基に、提案手法で構造物単体の固有振動数を同定した結果、正解値に対して1割程度の誤差で同定できる。

今後は、実測データを分析することで、提案手法の適用性をさらに検証していく予定である。このとき、地盤条件、基礎形式、支承の条件、連続する橋りょう・高架橋の基数などによっても、本手法の適用性、得られる結果の精度等が異なる可能性があるため、その適用範囲を把握することも重要と考えている。例えば、本稿は直接基礎形式の構造物を対象としているが、軟弱地盤上の杭基礎形式の構造物であれば、基礎構造物の変位が卓越することが考えられ、そのような条件での適用性は未確認である。なお、本手法を実務で適用する場合は、橋りよ

う・高架橋群で微動観測が必要となるが、微動計は可搬性に優れた小型な機器であり、30kg 程度の重錘の運搬、設置、打撃などの作業手間がある衝撃振動試験に比べると作業性はよい。そのため、本手法が確立すれば、衝撃振動試験よりも簡便な手法で、より直接的かつ正確に基礎構造物の健全度を判断できる可能性がある。

文 献

- 1) 中島章典, 中野喜代美, 中村晋: 常時微動に基づく独立橋脚および橋梁完成系の振動特性の把握, 構造工学論文集 Vol.56A, pp.305-314, 2010
- 2) 徳永宗正, 曾我部正道, 谷村幸裕, 小野潔: 常時微動測定に基づく鉄道高架橋の等価固有周期の推定手法, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.71, No.1, pp.72-86, 2015
- 3) 西村昭彦, 棚村史郎: 既設橋梁橋脚の健全度判定法に関する研究, 鉄道総研報告, Vol.3, No.8, pp.41-49, 1989
- 4) 西村昭彦: ラーメン高架橋の健全度評価法の研究, 鉄道総研報告, Vol.4, No.9, pp.14-21, 1990
- 5) 和田一範, 坂井公俊: 橋梁・高架橋群における下部工単体の固有振動数同定法の提案, 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol.77, No.2, I_25-I_34, 2021
- 6) 和田一範, 坂井公俊: 鉄道橋りょう・高架橋群を対象とした下部工単体の固有振動数同定法, 鉄道総研報告, Vol.37, No.5, pp.19-27, 2023
- 7) Brincker, R., Zhang, L. and Anderson, P.: Modal Identification from Ambient Response Using Frequency Domain Decomposition, *Proceedings of 18th International Modal Analysis Conference*, San Antonio, Texas, pp.625-630, 2000.
- 8) 和田一範, 坂井公俊: 鉄道橋りょう・高架橋群を対象とした下部工単体の固有振動数同定法の検証, 第 27 回鉄道工学シンポジウム論文集, pp.41-48, 2023
- 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 基礎構造物, 丸善出版, 2012

列車運転士の覚醒レベル低下防止支援システムの開発

鈴木 綾子* 星野 慧* 本田 真佐浩** 原 威史**

Support System for Preventing a Decline of Train Driver's Alertness Levels

Ayako SUZUKI Kei HOSHINO Masahiro HONDA Takeshi HARA

We developed a system to estimate train drivers' alertness levels from facial images and issue alerts. A laboratory experiment with general participants showed an accuracy of 80.1% for the eye region and 87.0% for the mouth region. Testing on operational trains confirmed accurate image capture and real-time alertness estimation under various lighting conditions. Using data from 13 operators, the model trained on 10 operators achieved 85.7% accuracy for the eye region and 71.9% for the mouth region when evaluated on the remaining 3. The alert sound received a high effectiveness rating of 5.3 out of 6, and device usability was rated 4.4 out of 5, demonstrating strong positive evaluations.

キーワード：覚醒レベル，運転士，眠気，ディープラーニング，画像，警報音

1. はじめに

鉄道運転士の勤務は不規則不定形の交替制勤務であり，サーカセミディアンリズムに起因する眠気の訴えも聞かれる¹⁾。運転士の居眠りに起因する事故・インシデント・輸送障害を防止するため，鉄道事業者は各社，保安装置の整備だけでなく，教育・研修による睡眠自己管理の啓発，休養所の整備等，様々な対策を講じている。しかしながら，居眠りによる事故やインシデント・輸送障害は発生しており，鉄道事業者にとって運転中の眠気対策は重要な課題となっている。

主に自動車分野では，各種眠気検知デバイスが開発されている。国内では既に小型カメラによる画像検知やウェアラブルデバイスを用いた装置が販売されている。また国外では，EUは2024年からすべての自動車（新車）に対し，先進安全装置の搭載を義務付けており²⁾，この先進安全装置の中に運転者の眠気と注意喚起システムが含まれている。これらの鉄道への応用可能性を検証すると，主に自動車を想定した眠気検知デバイスは，ステアリングパターンや車線内の車両位置等，鉄道分野では推定指標が適用できないものが多い。また，自動車運転席の狭い空間に最適化された検知システムであるため，鉄道運転士の場合には通常の動作範囲に含まれる動きも姿勢崩れや脇見と判定される可能性があり，それらをそのまま転用することは適さない。

そこで，本研究では鉄道運転士の覚醒レベルを顔画像から推定し，警報を提示する覚醒レベル低下防止支援システムを開発することを目的とした。開発に際しては，

鉄道事業者のニーズに基づき，運転士一人一人の負荷を減らすため，キャリブレーション不要であること，個人の機器管理が不要となるよう，デバイス等を身に着ける必要がないこと，コロナ禍を経て新しい生活様式が定着したことを踏まえ，マスク着用時にも利用可能であることを課題とする。

2. 覚醒レベル低下防止支援システムの開発

本研究で開発した覚醒レベル低下防止支援システム（以下，システムと略記）の構成を図1に示す。システムは，近赤外線カメラで顔画像を撮影するが，その際に現車環境における様々な光環境に対応するよう処理を行う。画面から顔を検出した上で，マスクの有無，覚醒レベルの推定を行い，推定された覚醒レベルが設定した閾値を超える場合に警報提示装置より警報音が鳴動する。以降では，本システムの各段階の開発について詳細を述べる。

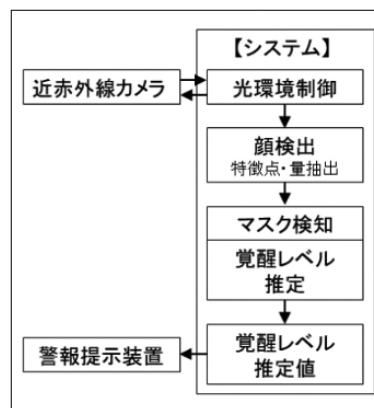


図1 覚醒レベル低下防止支援システムの概要

* 人間科学研究部 人間工学研究室

** 日本貨物鉄道株式会社

2.1 運転室の多様な光環境への対応

本覚醒レベル推定システムは、個人によるデバイスの管理を不要とするため、カメラを用いた画像検知を採用した。そのためには、画像が常に継続的に取得できることが重要であるが、一般に、運転室内の光環境は多様であるため、通常のカメラを用いた撮影では実現が難しい。そこで、運転室内の光環境において画像取得が難しい状況を選定の上、これらに対する方策を提案し、人工太陽照明灯（C-500EFSS、セリック）でその環境を再現した上で方策の効果を確認した。これらの対策の概要を以下に述べる。

2.1.1 夜間時の低照度環境への対応

夜間帯の乗務においては、運転時の室内は消灯状態となっている。そのため、運転室内は計器盤のみの明かりとなり、照度不足により通常のカラーカメラでは画像を捉えることが難しい。そのような低照度対策として、赤外線帯域に感度を有するカメラ（BFLY-U3-23S6M-C、FLIR）と赤外線照明（IRDL-50027、日進電子工業）を用いることで、0.2 lx 程度の低照度下でも顔画像を撮影できるようにした。なお、赤外線利用により、偏光レンズを使用したサングラスの着用時にも目の画像を取得することが可能である。

2.1.2 日中の高照度環境への対応

日中帯の乗務では、晴天の日など高照度環境下において顔画像が白飛びし、特徴量が抽出できないことを防ぐため、近赤外線の波長領域周辺の電磁波のみを選択的に透過するフィルタ処理を行い、約 10 万 lx の環境下で顔画像が取得できることを確認した。

2.1.3 トンネル・ビル間等の急激な照度変化への対応

列車がトンネルやビル間等を走行する場合の照度変化が急激な場合を想定し、顔画像の明るさが一定範囲に収まるようにカメラのゲインとシャッター時間をフィードバック制御するプログラムを組み込み、約 0.2lx と約 1 万 lx を 1 秒おきに交互に繰り返す条件でも顔画像が継続的に取得できることを確認した。

2.2 顔画像の検出

顔画像から覚醒レベルを推定するにあたり、画像から顔を検出し、特徴量を抽出する必要がある。顔検出の可能なオープンソースライブラリのうち、商用利用不可のもの等を除く、OpenCV、FaceTracker を用いて、顔検出と特徴量抽出をどの程度正確に行うことができるかを検証した。なお、OpenCV を使用する際には、機械学習ライブラリ Dlib と公開されているその顔特徴点抽出モデルを併用して、目・口の輪郭を抽出した。

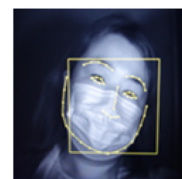
表 1 に、各オープンソースライブラリを各条件について比較した結果を示す。顔の傾きがある場合の検出可否、マスク着用時の検出可否、及び一度顔検出に失敗後、再

表 1 オープンソースライブラリ等による顔検出機能の比較

比較項目	OpenCV+Dlib	FaceTracker	顔検出用ディープラーニングエンジン+Dlib
顔の傾き	×	○	○
マスク着用時	△ パラメータ調整で検出閾値を下げれば可	× 特に黒いマスクの場合、顔を検出できない	○
復帰速さ	○	×	○



(a) マスク無



(b) マスク有・傾き

図 2 顔検出の実例

検出に要する時間について比較し、顔検出用のディープラーニング推論エンジンと Dlib を組み合わせる方法を採用した。これにより、顔の傾きがある場合やマスク着用時にも顔検出がなされ、フレームアウトなどにより一度顔検出が外れた場合も迅速に復帰して顔検出可能なことを確認した（図 2）。

2.3 マスク判定と覚醒レベル推定モデル

画像から検出された顔画像によって覚醒レベルを推定するために、2016 年から 2020 年にかけて鉄道総研の運転シミュレータ室内にて実験を行い、一般被験者 112 名（マスク着用画像は 46 名）の顔画像データを取得した。一人あたりのデータは 2 時間以上であり、FPS は 10 であることから、7 万枚以上のフレーム数となる。これらの画像データからマスクの有無を判定した上で、覚醒レベル推定を行うモデルを開発した。それぞれ、全データのうち約 8 割を学習データ、約 2 割をテストデータとして精度検証を行った。

2.3.1 使用したマスク

実験で使用したマスクは、図 3 に示す、一般に使用されることの多い素材 3 種類（不織布・布・ポリウレタン）と色（明度）の異なる 3 種類の合計 9 種類とした。なお、マスクの色が全て無彩色であるのは、赤外線環境で取得された画像を用いるためである。

2.3.2 覚醒レベルの真値

覚醒レベルの真値（正解値）として、眠気検知デバイスの開発が先行する自動車業界で主に眠気の実値として採用されている、北島他³⁾の眠気表情評定法による評価値を用いた（表 2）。

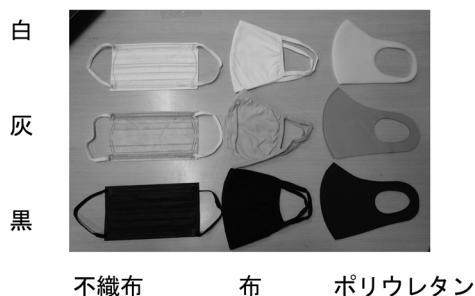


図3 使用したマスク（9種類）

表2 北島他³⁾の眠気表情評定法

評定値と眠気の程度	各段階における行動特徴
1：全く眠くなさそう	視線の移動が速く、頻繁である。瞬きの周期は安定している。動きが活発で身体の動きを伴う。
2：やや眠そう	視線移動の動きが遅い。唇が開いている。
3：眠そう	瞬きはゆっくりと頻発。口の動きがある。座り直し有り。顔に手をやる。
4：かなり眠そう	意識的と思われる瞬きがある。頭を振る、肩の上下動など無用な体全体の動きあり。あくびは頻発し、深呼吸も見られる。瞬きも視線の動きも遅い。
5：非常に眠そう	瞼を閉じる。頭が前に傾く。頭が後ろに倒れる。
6：寝ている	目を閉じている。

眠気表情評定法は、表2に示す1～5段階で顔表情による眠気度を2名以上のエキスパートが評価し、その κ 係数（一致率）がある一定以上の値となることを確認するものである。

本研究ではさらにこれに「6：目を閉じている」段階を追加し、6段階で評定するものとした。この眠気表情評定法に基づき、5秒間に1回、評定値が画像にアノテーションされ、この値を覚醒レベルの真値と見なした。

2.3.3 推定モデルの構築

推定モデルは、ディープラーニングを用い、汎化性能を高めることで、キャリブレーション不要とすることを目指した。

モデルは、同一のディープラーニングモデルにマスクの着用有無の判定と覚醒レベル推定の機能を統合した。各フレームに対する目・口の画像による推定と、座標点から算出した顔変位、目・口の開口度を用いた時系列解析による推定の2通りを構築し、各推定精度を比較した。なお、覚醒レベルの推定精度は、自動車を想定した眠気検知デバイス等との精度比較を可能とするため、自動車業界の精度算出方法の標準となっている、真値に対して ± 1 段階の誤差を許容した算出方法を用いた。

(1) マスク判定

テストデータによるマスク判定の推定精度は95.6%であった。

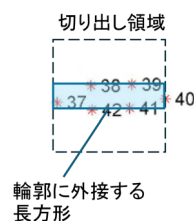


図4 右目の座標点と切り出し領域の例

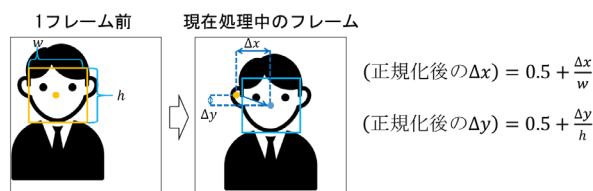


図5 顔変位の算出方法

(2) 画像判定モデル

学習の効率化のため、表2に示す通り、顔画像中、覚醒レベル低下の特徴が表れやすい目と口の周辺のみを学習に用いた。マスク有と判定された場合は目領域のみを切り出した画像から、マスク無と判定された場合は目領域、口領域それぞれを切り出した画像から覚醒レベル推定を行うモデルとした。切り出し範囲は、図4に示すように、当該部位の輪郭に外接する長方形の長辺を辺の長さとする正方形とした。なお、各アスタリスクは目の輪郭における座標点を表し、数字は座標点の番号を示す。

覚醒レベルの推定精度は、目領域のみの画像を用いた推定方法の場合、精度最良の学習パラメータ（入力サイズ80×80、重み減衰0.0005、バッチサイズ64）において80.1%、口領域のみの画像を用いた推定方法の場合、精度最良の学習パラメータ（入力サイズ80×80、重み減衰0.005、バッチサイズ64）において87.0%であった。

(3) 時系列解析モデル

表2を参考として、眠気の各段階に表れやすい画像情報のうち、時系列的な情報として、顔の動き（以下、顔変位）や目・口の開口度の変化がある。そこで、時系列情報を扱うLSTM（Long Short-Term Memory networks）⁴⁾を用いて、顔の動き、目・口の開口度の変化を入力データとすることとした。

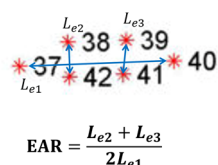
(a) 顔変位

顔変位については、顔領域の中心座標の2フレーム間の変位とした。絶対座標における変位を0～1に正規化した（図5）。ここで、1フレーム前の顔検出領域の高さを h 、幅を w 、縦方向の変位を Δx 、横方向の変位を Δy とする。

(b) 目・口の開口度

図6に示す目のアスペクト比（EARと表記）、口のアスペクト比（MARと表記）を使用する。各アスタリ

EARの算出（左目の場合）



MARの算出

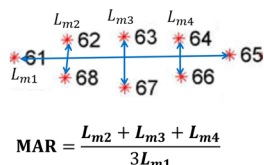


図6 目・口のアスペクト比の算出方法

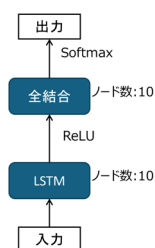


図7 時系列解析モデル構成の概要

クは目の輪郭における座標点を表し、数字は座標点の番号を示す。

(c) 時系列解析モデルと推定精度

時系列解析モデルは、LSTM層と全結合層で構成されるモデルとした（図7）。両層のノード数はともに10とし、タイムステップを複数パターン用意し、精度比較した。精度最良の学習パラメータ（タイムステップ30）における学習モデルによる推定精度はマスク無で58.6%、マスク有で47.9%であった。

（2）、（3）の検討より、より精度の高い画像判定モデルをシステムに採用することとした。

2.4 警報提示システム

覚醒レベルが低下した際に運転士に提示する警報として、視覚、聴覚、触覚、嗅覚等への刺激提示が考えられるが、覚醒レベルが低下した場合、視覚情報は遮断されやすく、警報が伝わりにくい。また、振動などの触覚情報の場合は、シート・マスコン等の改造やスマートウォッチなどの新たなデバイスが必要となる。その他の触覚情報として、顔に風を当てる・空調を下げる等の方法もあるが、空調設備の改造が必要となる上、これらは運転士が眠気を感じた際の対処方法として普段から実施されており、既に窓が開いた状態では警報として十分機能しない可能性もある。嗅覚は慣れが生じやすいことから、現段階では警報提示に適さないと考えられる。また、JR貨物の2運転区所の運転士経験者16名のヒアリング結果及び117名の運転士のアンケート結果より、警報の提示手法として最も支持されたのは音のみの提示であった。これらのことから、本研究では、覚醒レベル低下時の警報として警報音を用いることとした。以下に、警報音の開発の過程について述べる（表3）。

表3 一般被験者および運転士による実験内容^{12) 13)}

実験	被験者数	平均年齢±SD	実験条件
予備実験1	一般被験者28名	37.0±7.23歳	知覚性・機能性・識別性についての印象評価（背景騒音なし）
実験1	一般被験者27名	37.0±7.63歳	予備実験を経て選定された6つの警報音（75dB）について、走行音（75dB）下で、知覚性・機能性・識別性を一対比較
実験2	一般被験者29名	38.2±10.8歳	実験1で選定された警報音による覚醒効果の検討（パフォーマンス指標等各種指標による）
実験3	運転士99名	39.3±8.72歳	実験1で選定された警報音を含む5つの警報音（75dB）について、走行音下（68dB）で知覚性・機能性・識別性の印象評価

2.4.1 先行研究調査と警報音の作成

運転士を対象とするヒアリング・アンケート調査及び、先行研究調査等^{5) ~11)}により、警報音に必要な性質として、知覚性（聞き取りやすさ）、機能性（覚醒を促す）、識別性（他の音と取り違えない）の3条件を抽出し、それらの全てを満たす音15音を作成した。

2.4.2 一般被験者による実験

予備実験として、被験者に警報音の案15音を背景騒音のない条件で提示し、知覚性、機能性、識別性に関する印象評価を求めた。また、運転士経験のある管理職者に運転室内で実際に使用されている音と取り違える可能性のある音を特定してもらい、当該の警報音を除外した。

実験1として、予備実験によって選定された警報音の案6音について、トンネル外のポイント通過時を含む走行音を背景騒音として75dBで提示し、警報音の案を2音ずつ、知覚性、機能性、識別性について一対比較法による評価を行ってもらった。

実験2として、実験1によって選定された警報音1音を、前日の睡眠時間に制限を課した被験者に対して提示し、その機能性を自覚的指標、他覚的指標、パフォーマンス指標、生理的指標について検討し、警報音の覚醒効果があることが認められた。

各実験の被験者数、平均年齢、実験条件は表3の通りであった。

2.4.3 運転士による印象評価

一般被験者による実験結果が運転士にも一般化できることを確認するため、鉄道運転士による警報音の印象評価を行った（実験3）。実験1によって選定された警報音を含む5つの警報音の案について、実験1で用いた走行音を68dB、各警報音を75dBとした収録音源を再生し、印象評価を行った結果、回答の傾向は一般被験者と一致しており、また、実験1で選定された警報音の評価が最も高いことが確認された。

2.5 システムの開発

本章で提案した光環境方策、覚醒レベル推定モデル、警報音を搭載したアプリケーションを開発した（図1）。覚醒レベル推定には画像判定モデルを採用した。アプリケーションは、運転士が運転室内で単独で用いることを想定し、GUI機能を持たせ、パソコン画面のタッチのみで簡易に開始と終了ができるものとした。

顔画像を撮影する赤外線カメラ、赤外線照明については2.1.1項に示す機材を使用し、システム部はノートパソコン（Toughbook CF-20E, Panasonic）に移植し、警報提示装置としてコンパクトスピーカー（MPS3 パワード・スタジオモニタースピーカー、YAMAHA）を接続した。

カメラから顔画像を取得して覚醒レベルを推定し、結果を出力するまでの処理速度は約55msであり、FPSは10であることから、ほぼオンタイムに眠気推定が可能であり、その推定値は1秒間に10回更新される。

3. 現車試験による覚醒レベル低下防止支援システムの評価

3.1 覚醒レベル低下防止支援システムの動作確認と改良及び覚醒レベル推定精度検証

2.5節で構成した覚醒レベル低下防止支援システムが実際の現車環境においても実験室同様に動作することを確認すること、現車環境での運転士の顔画像データをモデルに再学習させること、モデルの覚醒レベル推定精度を検証することを目的に、現車試験（第1期）を実施した。本システムの覚醒レベル推定モデルは2.3.3項の一般被験者を対象とした顔画像を学習済みである。

現車試験（第1期）を経て、改良を行ったシステムを再度現車に搭載し、警報提示による覚醒効果、システムのユーザビリティを運転士のアンケートにより検証した（現車試験（第2期））。

現車試験（第1期）は、2021年8月3日から9月9日まで、覚醒レベル低下防止支援システムをJR貨物の電気機関車に搭載し、長大トンネル区間を走行する44列車を調査対象とした。

3.1.1 システムの動作確認

現車環境でのシステムの動作を確認したところ、夜間や日中、トンネル内等の走行時にも連続して安定的に画像を取得できることを確認した。

顔検出については、実験室実験では再現できていない背後の計器盤や景色が流れる車窓の風景など、比較的複雑な模様を顔と誤認して追従しようとするケースが認められた。

また、警報の効果を確認するため、覚醒レベルが一定の値となった場合に警報が提示されるように設定していたが、警報鳴動の閾値を高く設定（覚醒レベル5以上が

5秒以上継続）したため、警報が鳴動した列車はなかった。

3.1.2 顔検出システムの改良

顔検出ディープラーニングモデルについて、得られた44ファイルを用いて再学習を行った。その際、背後の計器盤の影響による誤検出を抑制するため、運転士が不在のフレームについても学習データに追加した。

改良の結果、学習前のモデルの顔検出結果と比較して、学習後の顔検出結果では、背景の計器盤や車窓風景、帽の社章等による顔の誤検出が抑制されていることが確認された。

3.1.3 覚醒レベル低下防止支援システムの精度検証

現車試験（第1期）で撮影した動画のうち、顔表情評定値が付与されている動画13個から、ランダムに10個を抽出して学習用データとし、残り3個をテスト用データとした。その結果、推定精度は目領域で85.7%、口領域で71.9%となった。主に目領域による覚醒レベル推定については、現車環境においても精度が高く維持されることが確認された。また、実験データと比較して口領域で精度が低下した原因として、実験室内のカメラの画角と営業車両運転席でのカメラの画角が異なっており、特に顔下半分で画角の差が顕著であったことが理由として考えられた。

3.2 覚醒レベル低下防止支援システムの効果検証

3.1節において顔検出システムを改良し、運転士のデータを再学習させたモデルを用いた覚醒レベル低下防止支援システムについて、警報提示による覚醒効果とユーザビリティを運転士のアンケートにより検証するため、現車試験（第2期）を実施した。

2021年12月17日から12月27日まで、覚醒レベル低下防止支援システムをJR貨物の電気機関車に搭載した。走行区間は現車試験1と同様であり、長大トンネル区間を走行する22列車を対象とした。基本的に設置時の動作確認を除き、試験関係者は添乗せず、システムの操作は全て運転士が行った。

3.2.1 覚醒効果とユーザビリティ評価

現車試験（第1期）では警報が一度も鳴動しなかったため、現車試験（第2期）においては警報鳴動の閾値を、第1期のデータを参考に、運転中に発生する可能性のある強さの眠気が検出できるように設定した。その結果、警報が鳴動した列車は7列車あった。そのうち、3列車で警報鳴動の覚醒効果に対する回答が得られた。回答の平均値は、6段階評定で5.3点（SD0.94）となった（図8）。

システムを実際に使用した上で、アンケートに回答した運転士14名にシステムの使いやすさ（ON、OFFなどの操作性等）を評価してもらったところ、5段階評定で4.4点（SD0.62）となった（図9）。

これより、現車環境においても警報音の覚醒効果、シ

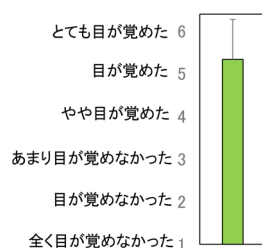


図8 覚醒効果

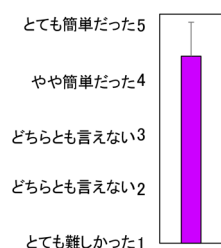


図9 ユーザビリティ評価

システムの使いやすさについて高評価が得られたといえる。

3.2.2 覚醒効果の維持について

現車試験において、添乗時の指導運転士1名に所定の覚醒レベルに達したタイミングで警報音を提示し、警報音についての印象評価を求めた。覚醒効果については9段階中8点、持続効果は9段階中8点となり、1名のみによる評価であるが、警報音に一定の覚醒効果、持続効果があることが示唆された。

4. 顔画像による覚醒レベル推定に関する考察

2.3.3項に示した通り、マスクの有無を判定する場合のように、物体検出においてはディープラーニングモデルは95%以上の精度を示したが、顔表情の推定は80%台の精度となった。顔認証のシステムは既に広く活用されているが、顔表情から感情を推定するシステムは実用化に至っていない。このことは、物体検出のような比較的単純な推定に比べ、顔表情の推定の難しさを示すものであり、覚醒レベル推定は覚醒度低下というある表情の側面をさらに6段階で評定しようとする点においてさらに難易度の高い課題であると言える。Ekman¹⁴⁾によれば、人の基本感情は民族や文化を超えて普遍的であり、その基本カテゴリーは怒り、恐怖、驚き、悲しみ、嫌悪、喜びであるとされている。ただし、近年ではこれら基本感情の表情が必ずしも日本人においては再現されないという研究¹⁵⁾もあり、日本人の表情表出の複雑さ等から、顔表情による感情推定はより難しいものになっている。

しかしながら、自動車運転を模擬した基礎的研究においての推定精度は83.0%¹⁶⁾という結果もあり、本推定法は既に実用化・製品化が進んでいる自動車業界の標準的な精度を達成していると考えられ、また、事前の個人情報等の入力やキャリブレーション、時間帯、線区や交番・仕業情報等も一切不要で、運転時の顔画像のみで覚醒レベル推定が可能となればその利便性は大きい。本モデルは、画像の各フレームに対する推定を行っており、時系列情報を含まないものであるが、近年はディープラーニングにおいて、本研究で評価を行ったLSTM以外の時系列解析モデルが複数発表されつつある。これら

の適用等によって、さらなる精度向上が期待されると考えられる。

5. まとめ

本研究では、運転士の覚醒レベルを顔画像から推定し、覚醒レベルが低下した際に警報音を提示するシステムを開発した。

運転室内の多様な光環境下でも継続的に顔画像が取得できることを確認した。先行研究や運転士の意見を基に警報音を作成し、実験室実験等により覚醒効果のある警報音を開発した。また、顔画像から覚醒レベルの推定モデルを構築し、実験室実験によって推定精度が80%以上となることを確認した。

これらの警報音や推定モデル等を搭載した覚醒レベル低下防止支援システムを開発し、目領域を用いた推定については、現車試験による精度が実験室実験を下回らないこと、警報提示の覚醒効果、システムのユーザビリティを確認した。

いずれも、現車環境において、概ね高い評価となり、本システムの実用性が確認された（本稿は文献12、13、17を基に、内容を再構成の上、加筆・修正した）。

謝 辞

本研究における現車試験の実施にあたり、日本貨物鉄道株式会社の北海道支社様、五稜郭機関区様、東北支社様、青森総合鉄道部様をはじめ関係者には多大なご協力を頂いた。また、顔表情評定法においては、公益財団法人大原記念労働科学研究所・北島洋樹先生にご指導を頂いた。この場を借りて厚く御礼申し上げる。

文 献

- 1) 澤貢, 山内香奈, 鈴木綾子, 村越暁子, 鈴木大輔: 貨物列車運転士の眠気の発生要因, 鉄道総研報告, Vol.26, No.1, pp.5-10, 2012
- 2) European Union, "Regulation (EU) 2019/2144 of the European Parliament and of the Council of 27 November 2019 on type-approval requirements for motor vehicles and their trailers, and systems, components and separate technical units intended for such vehicles, as regards their general safety and the protection of vehicle occupants and vulnerable road users. Official Journal of the European Union. 2019, L325, pp.1-40. Available from: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2019/2144/oj>.
- 3) 北島洋樹, 沼田伸穂, 山本恵一, 五井美博: 自動車運転時の眠気の予測手法についての研究: 第1報, 眠気表情の評定法と眠気変動の予測に有効な指標について, 日本機化学

- 会論文集 (C 編), Vol.63 (613), pp.3059-3066, 1997
- 4) Sepp Hochreiter and Jürgen Schmidhuber., "Long Short-Term Memory." *Neural Computation*, Vol.9(8), pp.1735-1780, 1997.
- 5) International Organization for Standardization, "ISO 7731 : 2003 (E) Ergonomics-Danger signals for public and work areas-Auditory danger signals, 2003.
- 6) 家電製品協会 ユニバーサルデザイン技術委員会：家電製品における操作性向上のための報知音に関するガイドライン 第2版, 2018
- 7) 和氣早苗, 上窪真一, 福住伸一, 旭敏之, 広明敏彦：音響インタフェース設計手法“報知音多次元設計手法”確立への一考察, 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol.J82-D-II, No.10, pp.1721-1728, 1999
- 8) 桑野園子：警告信号音の心理的評価, 騒音制御, Vol.25, No.1, pp.3-7, 2001
- 9) 岩宮眞一郎, 中嶋としえ：サイン音に和音を用いることの効果の検討, Vol.45, No.6, pp.329-335, 2009
- 10) 筒井信介：ゴジラ音楽と緊急地震速報, ヤマハミュージックメディア出版, pp.116-154, 2012
- 11) 藤田愛子, 岩宮眞一郎：継時的に鳴る2音の音高変化がサイン音の機能イメージに及ぼす影響, 日本音楽知覚認知学会平成18年度秋季研究発表会資料, Vol.25, No.6, pp.89-94, 2006
- 12) 星野慧, 鈴木綾子, 本田真佐浩, 原威史：列車運転時の覚醒レベル低下防止の警報音デザイン及び警報音の効果と実用性の検証, ヒューマンインターフェース学会論文誌, Vol.24, No.4, pp.215-230, 2022
- 13) 星野慧, 鈴木綾子, 本田真佐浩, 原威史：列車運転時の覚醒低下防止支援のための警報音のデザインと効果の検証, 鉄道総研報告, Vol.37, No.3, pp.29-35, 2023
- 14) Ekman, P., "An argument for basic emotions, *Cognition and Emotion*," Vol.6, No.3/4, pp.169-200, 1992.
- 15) Sato, W., Hyniewska, S., Minemoto, K., & Yoshikawa, S., "Facial Expressions of Basic Emotions in Japanese Laypeople," Vol.10, 2019, <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2019.00259>.
- 16) 式井慎一, 砂川未佳, 楠亀弘一, 望月誠, 北島洋樹, 下村義弘：眠気検知・予測技術に基づくドライバーモニタシステム, *Panasonic 技報*, Vol.64, No.2, pp.69-74, 2018
- 17) 鈴木綾子, 星野慧, 渡部貴浩, 中川千鶴, 本田真佐浩, 原威史：画像データによる運転士の覚醒レベル推定と運転支援システムの効果検証, 日本心理学会第88回大会 3A-096-PQ, 2024

BIM/CIM モデルを活用した鉄道 RC ラーメン高架橋の設計手法

小西 亮太* 渡辺 健*

Design Methodology for Railway RC Viaducts Using BIM/CIM Models

Ryota KONISHI Ken WATANABE

BIM/CIM can prevent rework in the construction process by allowing more time for the design process to be considered, and it can also shorten the total time taken for the design and construction processes compared to work that uses conventional two-dimensional drawings. This paper presents a new approach to design that links BIM/CIM models with design calculations. It proposes a program that automatically generates a three-dimensional frame analysis model from BIM/CIM models, and improves upon the conventional design and construction process.

キーワード：BIM/CIM モデル，鉄道 RC ラーメン高架橋，データ連携，省力化

1. はじめに

鉄道構造物の建設産業では，労働者人口の減少に伴う労力軽減が求められており，国土交通省は情報通信技術（ICT）の導入等により生産性向上を図る i-Construction を推進している¹⁾。i-Construction の取組みの 1 つとして，構造物の三次元モデルに寸法や材料強度等の属性情報を含めた情報モデル（BIM/CIM モデル）を構築し，その情報を活用する BIM/CIM（Building/Construction Information Modeling, Management）がある^{2) 3)}。既往の BIM/CIM では，建設プロセス（工程）における前工程である計画・調査・設計に負荷をかけて事前に集中して検討し，後工程である施工での手戻り等を防ぐ，フロントローディングによる累積業務コストの低減効果が期待されることが多い。

鉄道分野では，鉄道構造物等設計標準・同解説（コンクリート構造物）[第Ⅱ編 橋りょう]（以下，橋りょう編）⁴⁾ および鉄道構造物等維持管理標準・同解説（構造物編）[コンクリート構造物]⁵⁾ において，BIM/CIM の活用に関する記載がある。「設計」は，「構造物の要求性能の設定，構造計画，調査，構造詳細の設定，照査で構成される行為」と定義されており，照査の結果を設計計算書，設計図等に取りまとめて記録・保存し，「施工」や「維持管理」へ伝達することとされる。したがって，鉄道構造物等設計標準・同解説（コンクリート構造物）[第Ⅱ編 橋りょう]（以下，橋りょう編）⁴⁾ および鉄道構造物等維持管理標準・同解説（構造物編）[コンクリート構造物] 等，技術基準においても BIM/CIM の活用が手法の一つとして期待されており，今後，その効果的な活用方法について具体の提示が求められている。

本稿では，累積業務コストを低減するために，鉄道 RC ラーメン高架橋を対象とした BIM/CIM モデルを活用した照査ツールのデータ連携方法の提案し，作成した各データ連携プログラムについて示した。また，データ連携で作成した三次元解析モデルを用いた設計方法や，これらを活用した場合の RC ラーメン高架橋の設計作業の省力効果について報告する。

2. BIM/CIM モデルと照査ツールのデータ連携システム

2.1 既存の BIM/CIM ソフトの調査

土木構造物を対象とした BIM/CIM ソフトは，三次元形状の可視化を主目的として構造解析ソフトと連携しないものが多い。一方，線形範囲での骨組解析として，BIM/CIM モデルから構造解析ソフトに連携可能なものがあるが鉄道構造物における地震時の性能照査のように，部材の非線形特性を考慮した照査に対しては，整備されていない。

2.2 連携システムの構築

BIM/CIM を活用した設計において，BIM/CIM モデルを設計計算に連携できれば，計画，設計計算，図面作成を一貫して実施し，重複作業等に要する時間を短縮することが可能と考えられる。そこで，BIM/CIM ソフトで作成した BIM/CIM モデルデータから，解析ソフトの解析モデルデータを自動作成し，本モデルに荷重等を入力することで性能照査等が可能となる，BIM/CIM モデルを設計計算に連携させるシステム（以下，連携システム）を構築した。

図 1 に，連携システムのフローを示す。連携システムでは，BIM/CIM ソフトにより作成した BIM/CIM モデ

* 構造物技術研究部 コンクリート構造研究室

ル（第一層）から、中間ファイルと呼ばれる図面情報を出力し（第二層）、中間ファイルを解析ファイルと呼ばれる構造物の性能照査のための解析情報に変換し（第三層）、解析ソフトで解析ファイルを読み込み、荷重等を入力して性能照査等を行う（第四層）ことが可能である。

第一層は、BIM/CIM ソフトで作成した BIM/CIM モデルである。BIM/CIM モデルの作図ガイドラインを整備し、第二層以降に必要な情報を自動で適切に出力でき、かつ鉄道事業者や設計コンサルタントで統一された形式の BIM/CIM モデルが作成できるようにした。第二層は、中間ファイルと呼ばれる図面情報としての構造物の形状・寸法、配筋、材料情報等である。図面としての必要な情

報を有したファイルを出力しておくことにより、常時・地震時含めた様々な解析ソフトに対応可能な連携システムとした。第三層は、解析ファイルと呼ばれる構造物の性能照査のための解析情報としての構造モデルおよび断面情報であり、対象とする解析ソフトに合わせた解析ファイルの形式とする。第四層は、対象の解析ソフトで読み込まれた解析モデルに荷重等の解析に必要な情報を入力したデータである。解析ソフト上で、解析目的に応じた荷重や要求性能等を入力して設計計算や性能照査を行う。

2.3 BIM/CIM モデルの作図ガイドラインの作成

BIM/CIM モデルから図面情報および解析情報を自動で判別して抽出するため、BIM/CIM モデルの要素や属性情報を活用できる、BIM/CIM モデルの作図ガイドラインを作成した。本稿では、BIM/CIM ソフトとして Revit (ver.2021.1.3) と Civil 3D (ver.2020) を選定した。Revit はこれまで主に建築分野で用いられており、構造物のモデリングおよび属性情報の付与が容易であり、一部の鉄道事業者で鉄筋の干渉チェック等にすでに活用されている^{2) 3)}。Civil 3D は土木分野の三次元設計・施工用に特化して開発されており、測量データや地形モデルとの連携が可能で土木分野での活用が多くある^{2) 3)}。なお、Revit および Civil 3D は同じ AUTODESK 社の製品であり、データのやり取りや統合モデル作成などの互換性が高い。BIM/CIM モデルの作図ガイドラインは、Revit と Civil 3D で分けて作成したが、本稿では Revit を例に作図方法の考え方を示す。

今回は、一般的な整形の鉄道 RC ラーメン高架橋を対象とし、柱、フーチング、杭、梁（地中梁含む）、スラブ、スラブハンチ、鉄筋の作図方法を整備した。図 2 に、Revit によって作図された BIM/CIM モデルの要素が保持する情報を示す。要素には「カテゴリ」「ファミリー」「タイプ」の三階層を設定し、複数の要素を組み合わせることで RC ラーメン高架橋を作図する。最初に、Revit 上で規定されている分類である「カテゴリ」を選択し、「ファミリー」を作成する。「ファミリー」には、複数の「タイプ」

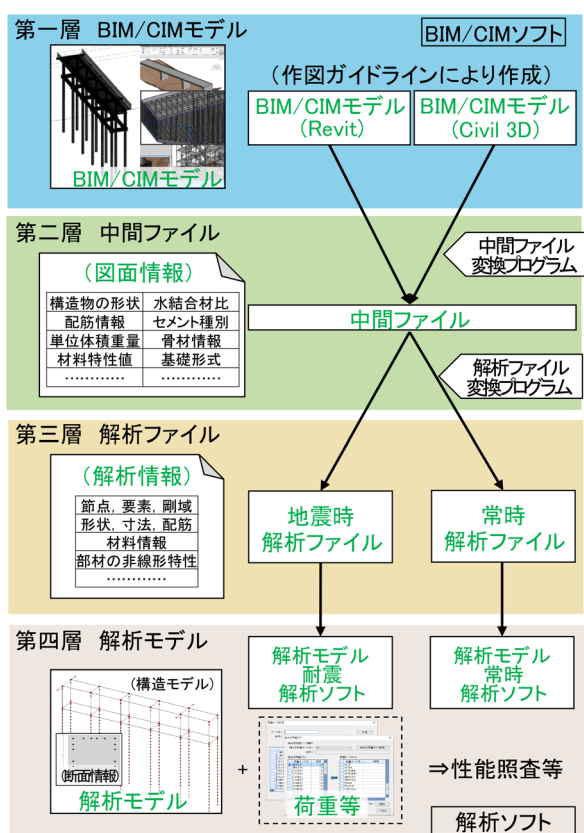


図 1 連携システムのフロー

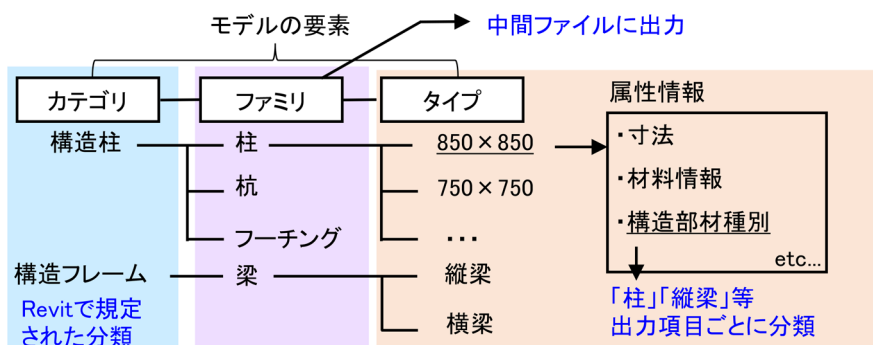


図 2 BIM/CIM モデルの要素 (Revit)

表 1 解析に必要な情報の分類

属性情報に付与	作図に必要な情報	断面形状, 鉄筋位置, 鉄筋径, 継手 等
	構造解析(常時, 地震時)に必要な情報	コンクリート(設計基準強度, ヤング係数, 普通or軽量 等) 鉄筋(引張強度, 引張降伏強度, ヤング係数, 異形or丸鋼 等) 鉄筋種別(軸方向鉄筋, 帯鉄筋 等)
	耐久性検討に必要な情報	水セメント比, 単位水量, 単位セメント量, セメント種 等
	(第四層で設定する情報)	荷重条件, 地盤条件, 安全係数, 照査項目の選択, 構造物単位で設定する情報(設計耐用年数, 列車荷重) 等

を設定し, 柱の場合「タイプ: 850×850mm」, 「タイプ: 750×750mm」のように対象の部材ごとに設定が可能であり, それぞれ属性情報を付与することができる。また, 「カテゴリ」による分類に加えて, 「タイプ」の属性情報で分類することで, 柱, 縦梁など, 設計計算に使いやすい区分で中間ファイルに出力することが可能である。なお, 構造物としての情報には含まれない荷重条件, 地盤条件, 安全係数, 照査項目等は, 設計者が第四層で解析ソフトに対応したものを直接付与することとし, 作図ガイドラインには記載しないこととした。属性情報は, 表 1 のように作図に必要な情報だけでなく, 常時または地震時の構造解析に必要な情報や, 耐久性検討に必要な情報も含めて付与することとした。

図 3 に, 部材のモデル化方法の例として, 柱のモデル化方法を示す。柱梁接合部など, 柱と梁の境界が曖昧な部分に対して, スラブ上端までを柱とするといったルールを整備し, BIM/CIM モデルの作図形式の統一を図った。本稿では一般的な整形の鉄道 RC ラーメン高架橋での活用を想定し, 柱は矩形・円形断面, 梁は矩形断面(ハンチ含む), 部材同士は直角接合, スラブは開口なし, 勾配はなし, フーチングは杭受台のみ, 杭はリバース工法(自然泥水)の場所打ち杭の条件で作図ガイドラインを整備した。

2.4 各変換プログラムの開発

2.4.1 中間ファイル変換プログラム

作成した BIM/CIM モデルから, 中間ファイルと呼ばれる図面情報としての構造物の形状・寸法や配筋, 材料情報等を出力する。中間ファイルは, 構造解析に必要な情報だけでなく, 耐久性の検討や施工に必要な情報等, 現行の図面に記載する情報をデータとして含む形とした。第一層から第二層への連携は, BIM/CIM ソフトの拡張機能(通称: アドオン)で行うこととし, BIM/CIM ソフト上の操作で BIM/CIM モデルを中間ファイルへ自動変換可能な中間ファイル変換プログラムを開発した。

図 4 に, BIM/CIM モデルから中間ファイルへの変換フローを示す。初めに, BIM/CIM モデルの出力対象構造物として, 構造部材(構造柱, 構造フレーム)・鉄筋としてモデル化した要素の情報を取得し, 部材ごとの配

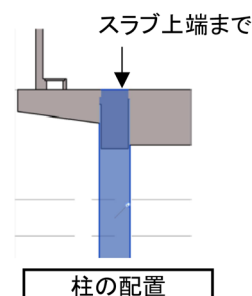


図 3 柱のモデル化方法

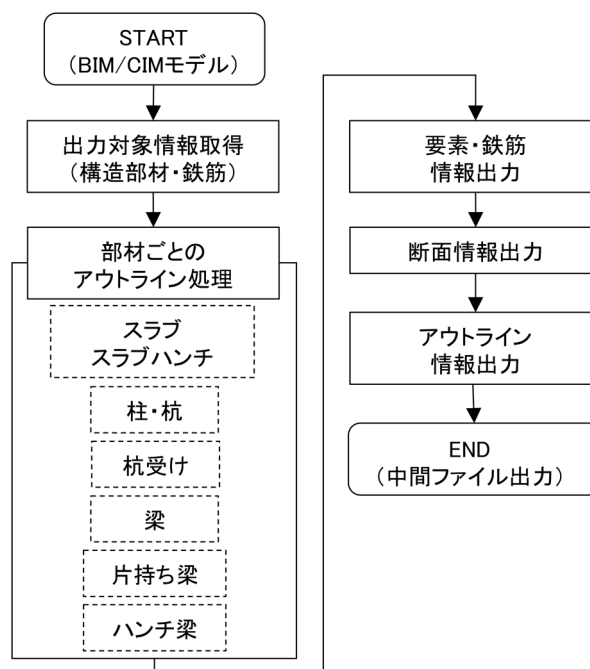


図 4 中間ファイルへの変換フロー

置や形状等をアウトライン(構造物の各部材の配置, 接続情報等を表す構造体の骨格の線)として処理し, 要素・鉄筋情報や断面情報をアウトライン情報として中間ファイルに出力する。アウトライン処理では, BIM/CIM モデルの構造部材の要素情報から, 部材ごとの座標情報と接続情報を含んだアウトラインを作成する。

図 5 に示すように, 梁(縦梁・横梁・梁のハンチ・片持ち梁), スラブのアウトラインは, 上面に沿って作成することとした。これは, 鉄道構造物では線路線形等を

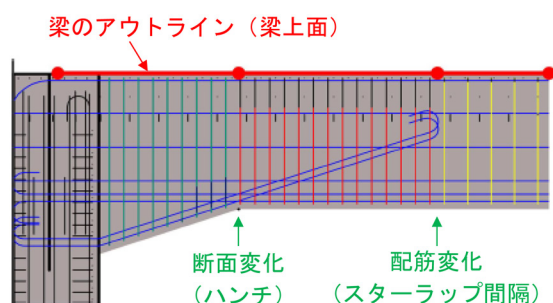


図5 梁のアウトライン

定めた上で設計する場合が多く、梁、スラブ上面が構造物の基準位置となるためである。同様の理由で、柱のアウトラインの端部はスラブ上面に設けることとした。一般に棒部材で表現される梁、柱・杭のアウトラインは部材軸方向に作成することとし、面部材で表現されるスラブは面を囲う辺で作成することとした。

2.4.2 解析ファイル変換プログラム

出力した中間ファイルを、解析ファイルと呼ばれる構造物の性能照査のための解析情報としての構造モデルおよび断面情報に変換するプログラムを開発した。第三層・第四層として、鉄道コンクリート構造物における常時および地震時の三次元骨組解析による設計計算への活用を想定している。本稿では特に地震時の性能照査等の部材の非線形特性を考慮した設計計算への活用を想定し、三次元骨組解析による地震時の性能照査プログラムDARS (ver.2.3.1.9) への連携を中心に検討した結果を示す。DARSでは地震波形および非線形応答スペクトル法による動的解析が可能であり、部材損傷を考慮した鉄道RCラーメン高架橋の地震時の性能照査が可能である。なお、引張鉄筋や側方鉄筋といった鉄筋区別やハンチ筋の有効範囲は、今後の不整形等への適用拡大を見通し、設計者が鉄筋に期待する機能や検討方向等を踏まえて設定可能とするため、第四層で設定することとした。

図6に、中間ファイルから変換した解析ファイルによる三次元骨組解析モデルの自動作成状況を示す。BIM/CIMモデルの三次元形状・寸法、配筋、材料情報等が適切に反映されており、本モデルに荷重条件、地盤条件、地震波、安全係数等を入力することで解析および性能照査が可能である。なお、常時の三次元性能照査プログラムへの展開も進めている。

3. 三次元モデルにおける中間スラブのモデル化方法

3.1 目的

データ連携システムを用いた場合、解析モデルは三次元となる。三次元解析において、作用等をどのようにモ

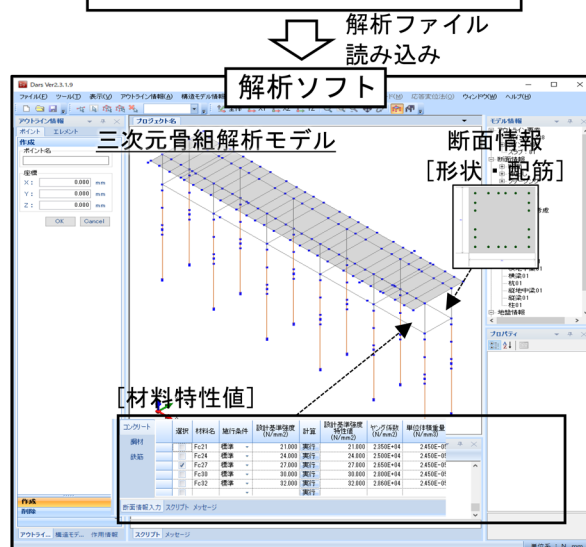
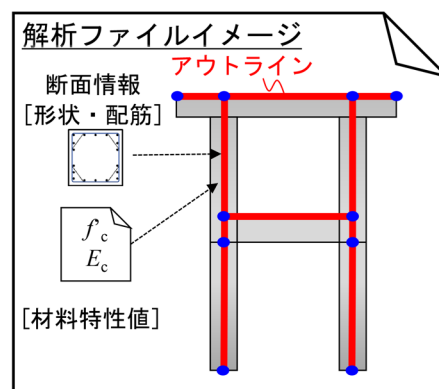


図6 解析モデルの自動作成状況

デル化する必要があるか検討する必要がある。本章では、中間スラブのモデル化方法を検討することで、作用の分担方法や解析モデルを活用した中間スラブの設計手法を提案することを目的とした。

3.2 梁部材における二次元モデルとの比較

ここでは、梁部材自重の分配に関する三次元の作用のモデル化について示す。

二次元の場合、部材自重のモデル化方法は縦梁と横梁に分配して計算する亀甲モデル⁵⁾がある。亀甲モデルでは、中間スラブの四隅から45°の亀甲状の線を引き、範囲内の荷重をそれぞれの縦梁と横梁に分布荷重として分配するが、これはスラブが受ける荷重が等分布荷重に近く、かつ縦梁と横梁の剛性がほぼ等しい条件に限られる。すなわち、偏心した荷重条件や縦梁・横梁の剛性が異なる条件では、適切に荷重を分配できない。そこで、図7に示すRCラーメン高架橋の中間スラブの位置に格子状の仮想梁を配置することで、三次元骨組解析でも偏心した荷重や縦梁・横梁の剛性を考慮して荷重分配を計算でき、容易に荷重の載荷位置を確認できる仮想梁モデルによる計算手法を用いることとした。なお、仮想梁モデルの

仮想梁の配置間隔は、配置間隔の細分化の感度解析結果に基づき、細分化の影響が小さくなる 1.0m 間隔とした。

図 8 に縦梁の最大断面力の比較を示す。端支点および端径間では、端横梁（桁受け部）の剛性が高いため、荷重分配到若干の差異が生じているものの、一般的なラーメン高架橋の縦梁・横梁の剛性では、2 次元亀甲モデルと三次元仮想梁モデルは概ね一致していることを確認した。これにより、今回提案したモデル化を用いた場合は、現状の設計結果と相違のない結果が得られることが確認できた。

3.3 中間スラブにおける断面力に関する FEM との比較

従来の中間スラブの設計で用いられる応答値を算定する近似解法として、Grashof-Rankine の方法⁶⁾がある。この方法は、偏分布荷重や集中荷重から等値等分布荷重を手作業で別途計算する方法である。

三次元骨組解析ツールでは中間スラブを格子状に分割した線材（交差梁）でモデル化した。図 9 (a) に交差梁モデルを示す。縦梁と横梁は矩形断面の剛性を用いて線材でモデル化し、交差梁は幅を交差梁の配置間隔、高さをスラブ厚とする断面の線材とした。また縦梁・横梁による拘束を表現するため、交差梁と縦梁・横梁が重なる範囲は剛域とし、鉛直な剛要素で接合した。

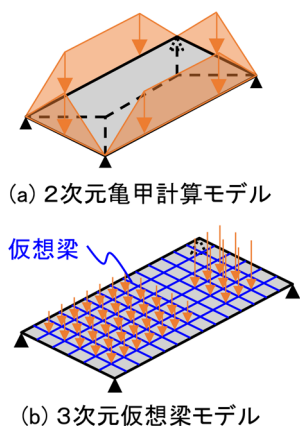


図 7 中間スラブ上面の荷重の設定方法

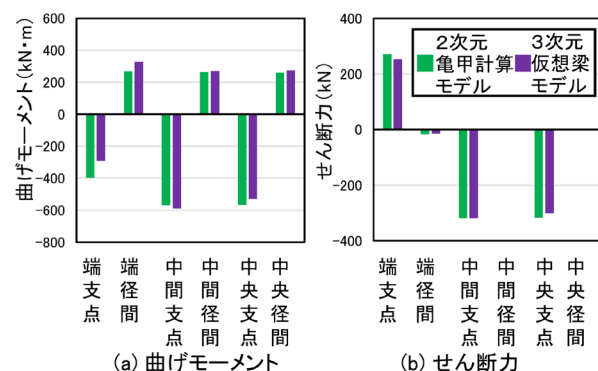


図 8 縦梁断面力の比較結果

交差梁モデルによる中間スラブの応答値の算定の妥当性を把握するため、最大値と最小値は近似解法、分布は有限要素解析（以下、FEM）モデルと比較した。図 9 (b) に、解析モデルを示す。モデル化の違いによる影響を明確にするため、RC ラーメン高架橋 1 径間の縦梁、横梁、中間スラブを抜き出して単純化したモデルで検討を行った。支点は梁柱接合部中心に相当する位置で固定支持とした。スラブの自重分の等分布荷重を想定し、交差梁モデルでは交差梁の交点、FEM モデルではスラブ上面の節点に点荷重を設定した。なお、交差梁モデルの交差梁の配置間隔は、配置間隔の細分化の感度解析結果に基づき、配置間隔の細分化の影響が小さくなる 1.0m 間隔とした。

図 10 に、交差梁モデル、近似解法、FEM モデルにおける中間スラブの曲げモーメントの算定結果を示す。交差梁モデルは、最大値・最小値は近似解法と、分布は FEM モデルと概ね一致しており、中間スラブの応答値を適切に算定可能と考えられる。

4. RC ラーメン高架橋の設計の省力化に及ぼす影響

4.1 検討の概要

図 11 に「計画」～「維持管理」までの流れを示す。本章では、この中で「計画」～「施工」までに着目し、

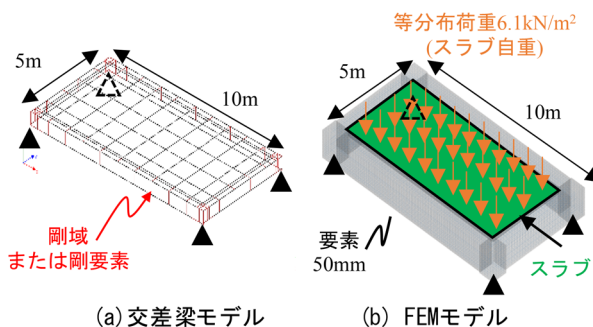


図 9 中間スラブの解析モデル

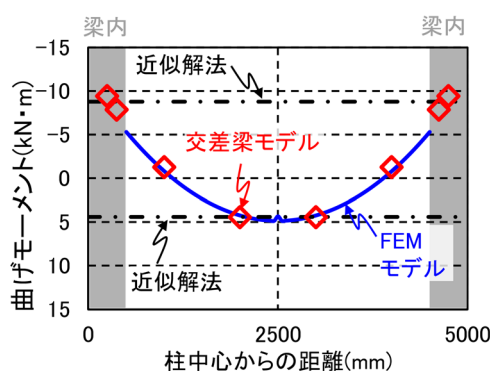


図 10 各解析手法での結果比較

BIM/CIM の活用が省力化に及ぼす影響を検討した。

図 12 に提案する設計手法について、「計画」「設計計算」「図面作成」「施工」に必要な各検討作業の時間（割合）を想定して省力効果を評価した。なお、①現状の設計の作業時間の合計を 100% として、② BIM/CIM モデルを干渉確認のみに用いた場合、および③ BIM/CIM モデルと照査プログラムを連携したツールを用いた場合（提案）を比較した。試算を行う条件として、設計は整形な RC ラーメン高架橋の詳細設計を実施すると仮定し、計画・設計計算・図面作成に必要な作業内容や想定される省力効果から試算を行った。施工については、個別の条件が大きく影響するため文献 3 の事例を引用し、試算した。

4.2 現状の設計と BIM/CIM を施工時の干渉確認のみに用いた場合

「計画」では、BIM/CIM モデルを作成する②では、周辺構造物との干渉解消等を検討するため、①に対して作業時間は増加する。設計計算に要する作業時間は、①および②ともに同一である。「図面作成」では、「計画」で作成した BIM/CIM モデルに設計計算で決定した配筋を追加して鉄筋干渉を解消する作業のため、②の作業は①に対して煩雑となる。一方、②ではモデルが唯一であるため、図面の齟齬の確認に必要な時間は減り、BIM/CIM モデル作図ツールに付属している自動集計機能により数量集計・確認作業に必要な時間も削減される。よって、「図面作成」に必要な作業時間は、若干増加する程度に抑えられる。「施工」に関する検討では、①の場合、周辺構造物との干渉や鉄筋干渉の解消の検討を実

施するため、修正設計を行うための手続きや設計見直し等に多くの時間を要している。②の場合、これらの手戻り作業が削減されるため、作業時間が短縮される。なお、「施工」の省力効果は、建設地点の周辺条件等にも依存するため、本稿では国土交通省の事例³⁾を参考に仮定している。

4.3 データ連携システムを「計画」～「施工」に活用した場合

データ連携システムを活用した③提案法では「計画」「設計計算」「図面作成」を連携して実施する。BIM/CIM モデルの作成、周辺構造物・鉄筋干渉の解消、数量計算は、②と作業は同一である。設計計算では、解析モデルが自動で作成されるため、②での解析モデルの繰り返し作成、確認が不要である。「施工」では、②と作業は同一である。すなわち、設計に必要な検討時間について、③提案法は、①現状の設計、および② BIM/CIM モデルを干渉確認のみに用いた場合、と比較して、大幅に削減可能となることが予想される。

5. おわりに

本稿では、新設鉄道コンクリート構造物の建設工程の累積業務コストを低減するため、BIM/CIM を有効活用した設計手法を提案した。これらにより、三次元で作成された整形な RC ラーメン高架橋の BIM/CIM モデルから、専門的な技能を必要とせずに、三次元骨組解析モデルを生成することができ、本モデルに作用等の条件を設定することで性能照査を行うことが可能となった。また、提案したフローに基づく作業時間の比較結果を示した。

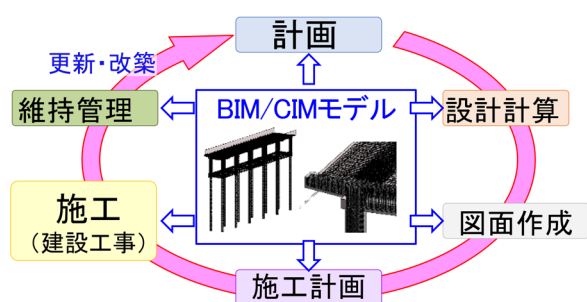


図 11 BIM/CIM を活用の流れ

①現状の設計	計画 10%	設計計算 20%	図面作成 20%	施工 50%	
②BIM/CIMモデルを干渉確認のみに使用	計画 15%	設計計算 20%	図面作成 25%	施工 25%	省力効果 15%
③提案法	計画+設計計算+図面作成 45%			施工 25%	省力効果 30%

図 12 各設計フローでの作業時間の比較

文 献

- 1) i-Construction 委員会：i-Construction～建設現場の生産性革命～，2016
- 2) 国土交通省：BIM/CIM 活用ガイドライン（案），国土交通省 BIM/CIM ポータルサイト，<https://www.mlit.go.jp/tec/content/001334804.pdf>（閲覧日：2023 年 11 月 10 日）
- 3) 国土交通省大臣官房技術調査課：初めての BIM/CIM，国土交通省 BIM/CIM ポータルサイト，http://www.nilim.go.jp/lab/qbg/bimcim/bimcim1stGuide_R0109_hidaritojiryomen_0909.pdf（閲覧日：2023 年 11 月 10 日）
- 4) 国土交通省鉄道局監修，鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説（コンクリート構造物）[第Ⅱ編橋りょう]，丸善出版，2023
- 5) 国土交通省鉄道局監修，鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等維持管理標準・同解説（構造物編）[コンクリート構

造物] 一令和 4 年付属資料改訂版一, 丸善出版, 2022
6) 国土交通省鉄道局監修, 鉄道総合技術研究所編: 鉄道構造

物等設計標準・同解説 (コンクリート構造物) [第Ⅲ編コンクリート構造], 丸善出版, 2023

鉄道総研報告 監修スタッフ

■監修責任者

芦谷公稔

■編集責任者

小島謙一

■企画・監修

川崎邦弘	上半文昭	石毛 真	武内陽子
仁平達也	瀧上唯夫	田所敏弥	根津一嘉
桃谷尚嗣	布川 修	福田光芳	平井 力
松井元英	池田 学	宇田東樹	遠藤広晴
富田 優	豊岡亮洋		

鉄道総研報告 第39巻 第9号

2025年9月1日 発行

監修・発行所：公益財団法人 鉄道総合技術研究所

〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38

©2025 Railway Technical Research Institute

本誌に関するお問い合わせ先
総務部広報 電話 042-573-7219

RTRI REPORT

Vol. 39 No. 9

Sep. 2025

PAPERS

- Estimation of Wheel/Rail Contact Conditions Based on State Space Model Using Acquired Data by Instrumented Wheelset
.....S.KUNIYUKI, T.HONDO, M.SUZUKI, T.MIYAMOTO, K.NAKANO (1)
- Development of a Tri-axial Magneto-optical Probe for Measuring Magnetic Fields in the Low-frequency Bands
.....Y.KATO, M.IKEHATA (9)
- Application of Liquefied Stabilized Soil in Construction of Railway Earth Structures
.....S.NAKAJIMA, Y.KURAKAMI, K.OTA (17)
- Basic Study on Crack Detection Method for PC Sleepers Using Deep Learning Model
.....S.MINOURA, T.WATANABE (25)
- Experimental Analysis of Mechanism of Steady State Caused by Huge Earthquakes and Development of an Effective Stress Analysis Method for Sandy Soil
....T.ONODERA, R.IBUKI, J.IZAWA, K.FUKUTAKE, T.KIRIYAMA, S.MABUCHI, T.KODAMA (33)
- Validation of Natural Frequency Identification Method for Individual Bridges and Viaducts, Excluding the Effects of Adjacent Structures
.....K.WADA, K.SAKAI (43)
- Support System for Preventing a Decline of Train Driver's Alertness Levels
.....A.SUZUKI, K.HOSHINO, M.HONDA, T.HARA (51)

RESEARCH REPORT

- Design Methodology for Railway RC Viaducts Using BIM/CIM Models
.....R.KONISHI, K.WATANABE (59)

