

鉄道総研報告

第40巻 第7号

2026年7月

論文

- 車両** 台車部品の探傷データに対する機械学習に基づくきず検出手法
..... 牧野一成, 小笠原柚 (1)
- 車両** 一本リンク式牽引装置による車両の異常検知手法
..... 嵯峨信一, 飯田忠史, 中橋順一 (11)
- 施設** 水分移動を考慮したひずみ解析に基づく PC 箱桁橋りょうの長期変形予測
..... 橋本龍, 田中伸明, 渡辺健 (21)
- 施設** 大型土のうの本設利用による被災盛土の早期復旧法
..... 佐藤武斗, 松丸貴樹, 伊藤壱記 (31)

台車部品の探傷データに対する機械学習に基づくきず検出手法

牧野 一成* 小笠原 柚*

A Machine-Learning-Based Flaw Detection Method for Inspection Data of Bogie Parts

Kazunari MAKINO Yu OGASAWARA

Nondestructive inspections such as magnetic particle testing and ultrasonic testing are used to inspect railway vehicle bogie parts. However, identifying flaws from images or waveforms requires significant experience. Therefore, we developed a machine-learning-based method to automatically detect flaws. In magnetic particle testing, false indications caused by surface roughness require discrimination. Our model extracts suspected regions and identifies connected ones as flaws, achieving an accuracy of about 70%. In ultrasonic testing, where surface-shape echoes are confused with flaw echoes, a model trained on simulated waveforms detected internal flaws with an accuracy exceeding 95%. These methods enable uniform identification and de-skilling of flaw detection.

キーワード：台車部品，磁粉探傷，超音波探傷，機械学習，畳み込みニューラルネットワーク

1. はじめに

鉄道車両の台車枠，輪軸などの台車部品に対しては，従来，磁粉探傷や超音波探傷などの非破壊検査が行われている¹⁾。台車部品の磁粉探傷で，特に台車枠に関しては，台車枠に起因した近年の重大インシデントの発生に伴って探傷検査箇所は増加傾向にある²⁾。一方で，検査業務の省力化，省人化や脱技能化が求められているが，磁粉探傷ではきず指示模様の判定に相応の経験，技能や知識を要し，技術継承における継続的な課題となっている。その対策の一つとして，台車枠の磁粉探傷検査の自動化が考えられる。具体的には，磁粉探傷で取得した画像に対して機械学習を適用し，きずを自動的に検出する手法である。台車部品の超音波探傷に関しては，横軸を受信時刻に相当する距離（ビーム路程），縦軸をエコー高さとして表示した波形をもとに探傷する場合，ある時刻（距離）に現れたエコーの高さがしきい値を超えたときに「きず」と判定するのが一般的で，波形の解釈には経験を要する。このような時刻歴の波形データに対して機械学習を適用すれば，探傷の自動化が実現できる可能性がある。また，波形の画面をキャプチャした「画像」を用いれば，磁粉探傷と同様に画像に対して機械学習が適用可能となる。

非破壊検査においては近年，外観検査，磁粉探傷，赤外線サーモグラフィ等で得られた画像データや，超音波探傷で得られた波形や断面像に対して，AIや機械学習を適用する研究が活発に進められている³⁾。そこで本報告では，台車部品の探傷を人手に依らず自動化するための要素技術として，台車枠の磁粉探傷や超音波探傷で得られた結果に対して機械学習を適用し，磁粉模様あるいは超音波波形からきずを自動的に検出する手法について述べる。磁粉探傷では，溶接試験片の磁粉探傷画像を分割して作成した多数の画像を畳み込みニューラルネットワーク（CNN：Convolutional Neural Network）⁴⁾で機械学習させ，きずの検出時には，きず疑いの箇所が複数つながっていれば「きず」と判定する手法を検討した。超音波探傷では，台車枠の探傷を想定した波形を「時刻歴データ」として機械学習させたモデル，および波形のキャプチャ画像をCNNで機械学習させたモデルを作成し，それらのきず検出性能を評価した。

* 車両技術研究部 車両強度研究室

2. 磁粉探傷画像の取得

2.1 試験片

磁粉探傷画像の取得には、溶接欠陥試験片（Sonaspection International Ltd.製：21体，Flaw Tech Inc.製：10体，計31体）を用いた。試験片形状の内訳はT継手が8体，突合せ継手が23体である。各試験片には溶接内部のきずを含む複数のきずが設けられているが，磁粉探傷で検出可能な表面きずのみを対象とした。

2.2 画像の取得方法

磁粉探傷画像取得時の使用機材一覧を表1に，機材配置を図1に示す。カメラの画角を「引き」「標準」「寄り」の3通り，ブラックライトの照射の向きを「下から」「左から」の2通りとし，撮影条件を変えながら画像を取得した。きずがある部位の画像だけでなく，学習に必要な「きずなし画像」も取得した。

表1 磁粉探傷画像取得時の使用機材一覧

実施項目	種別	名称
磁粉探傷試験	磁化装置	携帯型交流極間式磁化器 NC-21 (日本電磁測器株式会社製)
	ブラックライト	LB-104 (電子磁気工業株式会社製)
	磁粉液	蛍光磁粉液 SY-8000 (栄進化学株式会社製)
画像取得	デジタルカメラ	PowerShot G10 (キヤノン製, 記録画素数 1600×1200px, Y2 フィルタ装着)

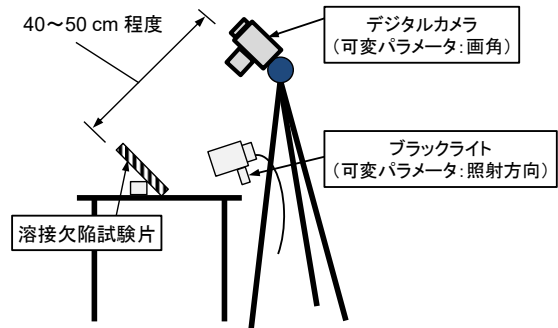


図1 磁粉探傷画像取得時の機材配置

2.3 取得した画像

T継手のきずあり箇所において，画角およびブラックライトの照射の向きを変化させて撮影した画像の例を図2に示す。きずによる磁粉模様ほかに，溶接ビードの凹凸での磁粉の付着による疑似模様が確認できる。2.2節に示した方法で，きずを含む画像を約600枚，含まない画像を約700枚取得した。

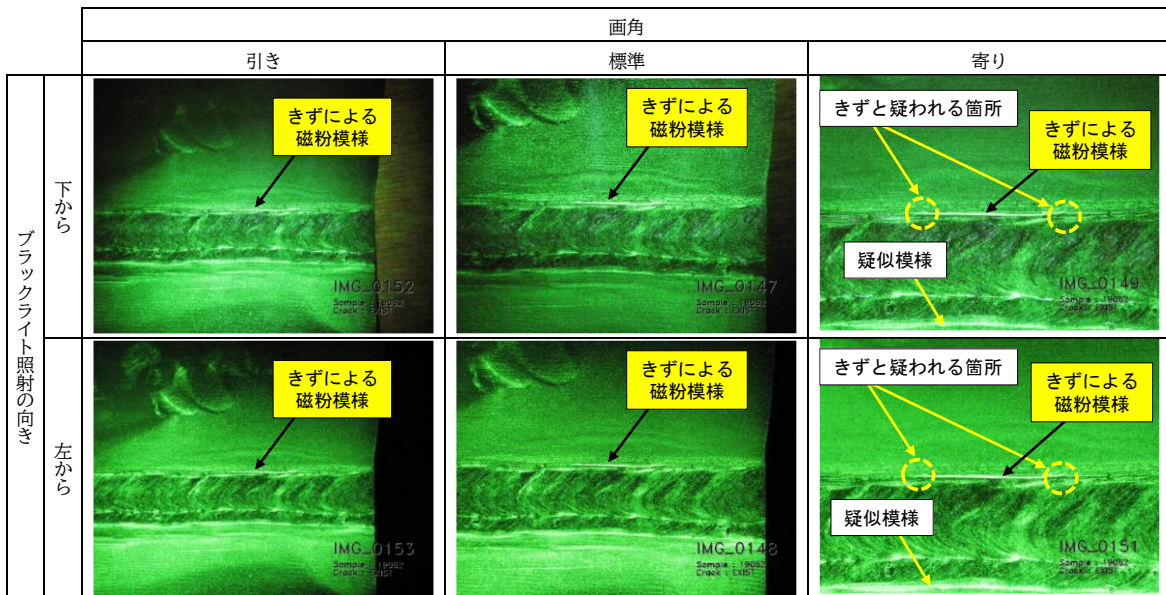


図2 T継手のきずあり箇所撮影した画像の例

3. 磁粉探傷画像の機械学習によるきず検出

3.1 機械学習によるきず検出の手順

3.1.1 全体の流れ

本章では、磁粉探傷画像の機械学習によるきず検出の概要と、それをういたきず検出結果について述べる。本研究では、画像におけるきずの有無の分類問題に対して、CNN による教師あり学習を行った。CNN は 2 次元的な構造を有するデータをそのまま学習に用いることができる手法であり、画像を用いた機械学習に適している。

磁粉探傷画像に対する機械学習によるきず検出の手順を、図 3 および以下に箇条書きで示す。

- ① 磁粉探傷画像を学習用画像とテスト用画像に分ける。
- ② 学習用画像から分割画像を作成し、各分割画像にきず有無の情報を付与する。
- ③ 分割画像ときず有無の情報を機械学習プログラムに入力する。
- ④ 機械学習プログラムを実行し、学習済みモデルを生成する。
- ⑤ 学習済みモデルを用いて、テスト用画像に対して分割領域ごとのきず検出を行う。
- ⑥ 分割領域ごとのきず検出結果から、画像全体におけるきずあり/きずなしの判定を行う。

3.1.2 画像の準備

手順①では、2.3 節で述べた約 1300 枚の画像のうち、極端な白飛びやボケがある画像を除外し、658 枚を学習用画像、198 枚をテスト用画像として、両者が重複しないようにランダムに選択した。

手順②では、学習用画像 (1600×1200px) を 100×100px で 192 分割 (16×12 分割) し、658×192=126336 枚の分割画像を作成した。各分割画像を目視で確認し、教師あり学習に必要なきず有無の情報 (きずあり=1, きずなし=0) を付与した。分割画像の作成ときず情報の付与について図 4 に示す。

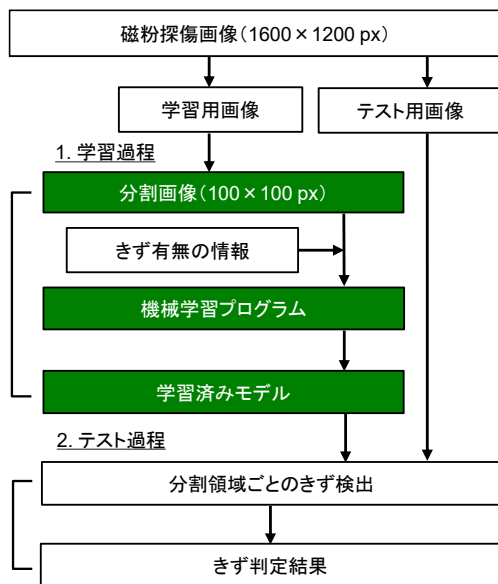


図 3 磁粉探傷画像に対するきず検出の手順

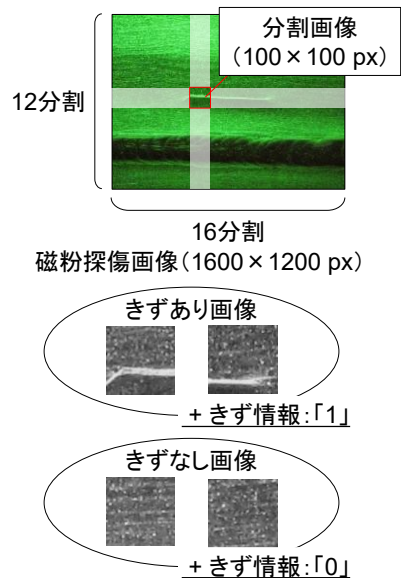


図 4 分割画像の作成ときず情報の付与

3.1.3 学習過程

学習用画像から作成した上述の 126336 枚の分割画像は、その大半がきずなし画像で、きずありの画像は限られている。そこで、きずあり画像の枚数を基準として、きずあり/きずなしの比率を確保しつつラン

ダムに選択し、「訓練データ」と「検証データ」の2種類に両者が重複しないように分類した。学習に用いた分割画像の枚数の内訳を表2に示す。検証データとは、訓練データを用いた学習の途中できず検出を試行し、学習モデルの精度の確認および向上のために用いるデータのことをいう。

手順③、④で用いた学習モデルの構成を図5に示す。訓練データ、検証データ両方の画像に対してグレースケール化および輝度値の正規化の前処理を行ったうえで、畳み込み層が5層、プーリング層が4層で構成される自作のCNNモデルに入力した。各畳み込み層における活性化関数にはReLU関数を用い、過学習を防止する目的でドロップアウトを設けた。その後、平坦化、全結合層を経て、最終的にSoftmax関数によりきず有無の判定（きずあり／きずなし）が得られる。CNNにおけるエポック数（学習の繰返し回数）を50、バッチサイズ（一度に入力する画像の枚数）を16として学習プログラムを実行し、判定結果が実際のきず有無の情報に合致するように学習を進め、学習済みモデルを生成した。

表2 機械学習モデルの学習過程で使用した分割画像の枚数内訳

単位：枚		きずあり	きずなし	総枚数
学習用分割画像（7200）	訓練データ	720	5040	5760
	検証データ	160	1280	1440

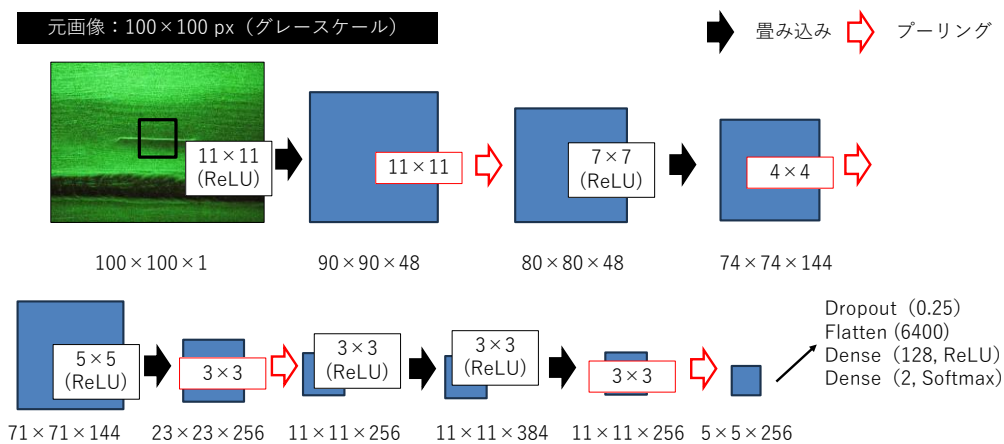


図5 磁粉探傷画像の学習モデルの構成（CNNモデル）

3.1.4 テスト過程

手順⑤、⑥のテスト過程では、テスト用画像（1600×1200px）に対して、100×100pxの分割領域ごとに学習済みモデルを用いてきず検出を実施し、「分割領域内にきずが含まれる」と判定された場合に、テスト用画像の当該箇所を赤枠囲みで示すこととした。また、各分割領域の境界付近におけるきず検出精度を高めるため、最初の分割から縦・横方向に50pxずつずらした領域ごとのきず検出も同様に実施し、きずありと判定された箇所を青枠囲みで示すこととした。

3.1.5 学習済みモデルの精度評価

テスト用画像を用いたきず検出結果に基づき、学習済みモデルの精度評価を実施した。分割領域ごとのきず検出結果を、真陽性（TP：True-Positive）、偽陽性（FP：False-Positive）、真陰性（TN：True-Negative）、偽陰性（FN：False-Negative）の4種類に分類した混同行列を作成し、正解率、適合率、再現率、F1値を算出した。各評価指標の定義を図6に示す。正解率はきずの有無を正しく予測できた割合、適合率はきずの誤検出の少なさ、再現率はきずの見逃しの少なさ、F1値は適合率と再現率の調和平均（バランス）を表す指標で、いずれの指標も1に近いほどモデルの性能がよいことを表す。

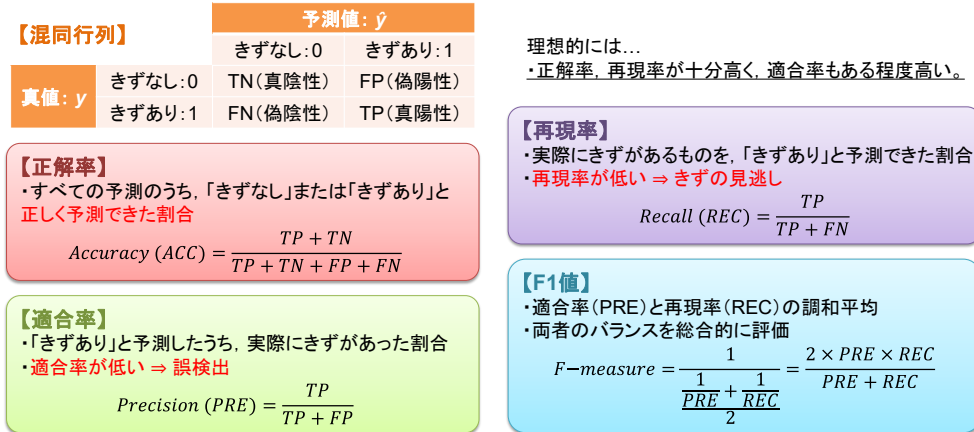
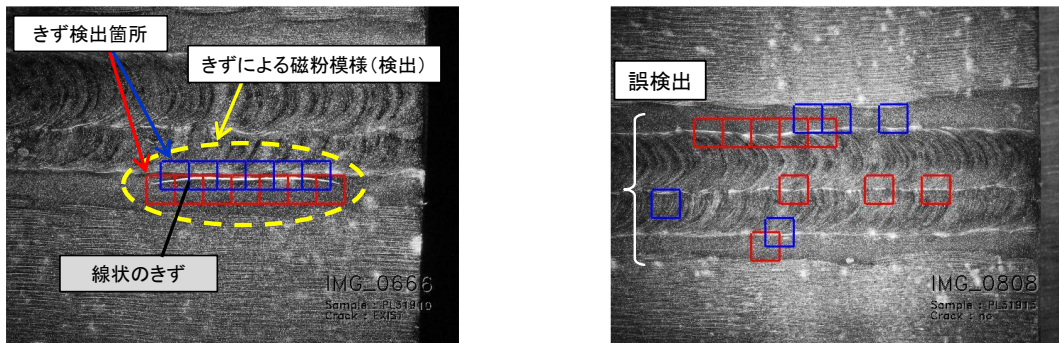


図6 機械学習における成績(評価指標)の定義

3.2 磁粉探傷画像のきず検出結果

3.2.1 テスト用画像に対するきず検出の例

198枚のテスト用画像に対して学習済みモデルを用いてきず検出を行った。きず検出結果の例を図7に示す。図7(a)はきずを含む画像の例で、きずによる磁粉模様の箇所が赤枠または青枠で囲まれており、きずが正しく検出されている。一方、図7(b)はきずを含まない画像の例で、正しく評価されれば枠囲いの箇所が生じないはずだが、溶接止端部や、溶接ビードの形状変化部での疑似模様がきずとして誤検出されていた。



(a) きずを含む画像

(b) きずを含まない画像

図7 テスト用画像に対するきず検出の例

3.2.2 きず検出精度の確認

すべてのテスト用画像に対してきず検出を行い、分割領域ごとのきず検出結果を分類した混同行列を表3に、算出されたきず検出精度の評価指標を表4に示す。対象とした分割領域の総数は、198枚のテスト用画像を192分割した $198 \times 192 = 38016$ 領域である。ここでは、赤枠の分割領域に対する結果を示すが、青枠に対する結果も同様であった。表4より正解率は99%と高いが、表3の混同行列で、きずなし領域を「きずなし」と判定した件数が極端に多い(37206件)ためである。一方、適合率は50%であった。これは、「きずあり」と判定した領域のうち半数は正解だったが、残りは誤検出(実際にはきずなし)であったことを意味する。再現率は67%で、実際にきずがある領域に対して「きずあり」と判定できたのが2/3程度(1/3程度は見逃し)であったことを意味する。

表3 テスト用画像におけるきず検出結果の分類
(混同行列：赤枠囲みの場合)

領域総数：38016		学習済みモデルによるきず検出結果（予測）	
		きずなし	きずあり
磁粉探傷結果 (真値)	きずなし	37206	328
	きずあり	160	322

表4 学習済みモデルの精度評価結果

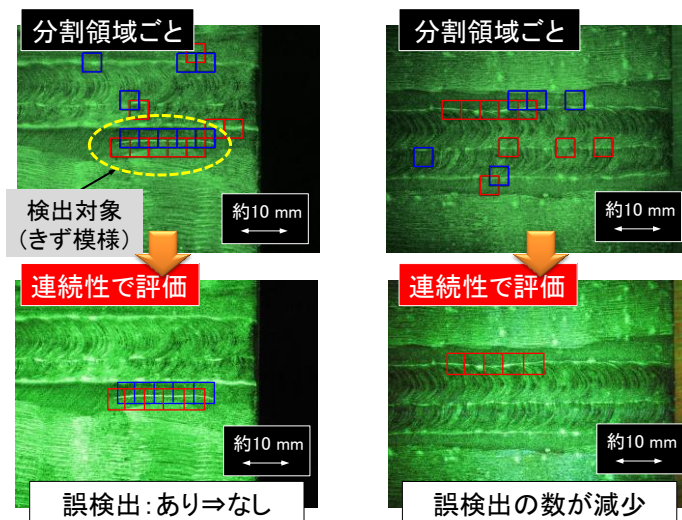
項目	精度 (%)
正解率 (Accuracy)	99
適合率 (Precision)	50
再現率 (Recall)	67
F1 値 (F-measure)	57

3.2.3 きず検出領域の連続性を考慮したきず判定

図7(a)の赤・青枠で示したように、「きずあり」と判定された領域が実際にきずであった場合には、検出領域の枠が複数個連続している場合が多い。一方、図7(b)で「誤検出」と示した箇所は、一部の例外はあるが、その多くは連続する枠の数が2個以内に収まっている。そこで、きずありと判定された分割領域が複数つながっていれば「きず」と判定することで、きずの誤検出を低減し、正解率および適合率を向上させる手法を検討した。ここでは、きず検出の枠が3個以上連続したときにきずと判定することとした。

この方法により誤検出が低減した例を図8に示す。図8(a)では、溶接部の疑似模様によって「きずあり」と判定されていた枠が連続性判定により除外され、画像全体で正しく「きずあり」と判定された。図8(b)（図7(b)と同一箇所）も同様に、疑似模様による誤検出の枠の大半が連続性判定により除外された。ただし、この例では誤検出の枠が残っており、画像全体としては「きずあり」判定（誤検出）のままである。

きず検出領域の連続性を考慮したきず判定により、テスト用画像の画像単位できずの有無を判定した。きずなし画像118枚は、画像全体をそのまま1枚の画像として判定した。一方、きずあり画像80枚については、きずの有無が明確な領域ごとに評価を行うため、各画像からきず周辺の部分を切り出し、これを新たな「きずあり画像」、それ以外の部分を「きずなし画像」として定義した。すなわち、のべ枚数で118+80+80=278枚の画像に対して判定を行った。連続性判定による画像単位での判定結果（混同行列）を表5に、各評価指標を表6に示す。表6では比較のために、表4に示した分割領域ごとに判定したときの評価指標を再掲した。連続性判定により、きずの見逃しの少なさの指標である「再現率」が67%→68%とほぼ維持されたまま、誤検出の少なさの指標である「適合率」が50%から70%に上昇し、連続性判定の有効性が示された。



(a) きずあり画像への適用例 (b) きずなし画像への適用例

図8 きず検出領域の連続性の考慮による誤検出の低減

表5 テスト用画像の画像単位でのきずの有無の判定結果（混同行列）

画像の枚数：278 (のべ枚数)	学習モデル+連続性判定		
	きずなし	きずあり	
磁粉探傷結果 (真値)	きずなし	175	23
	きずあり	26	54

表6 連続性判定によるきず検出精度と分割領域のみでの結果との比較

項目	精度 (%)	
	分割領域のみ	連続性判定
正解率	99	82
適合率	50	70
再現率	67	68
F1 値	57	69

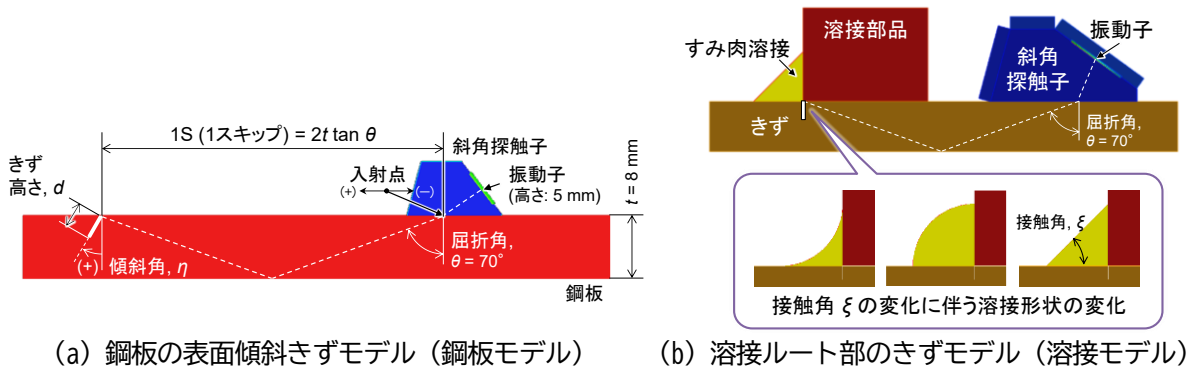
※赤いセルは、両者のうち精度が高いほうを示す。

4. 超音波探傷波形の機械学習によるきず検出

4.1 超音波探傷波形の準備

4.1.1 超音波探傷の解析モデル

本研究では、機械学習させるための超音波探傷データを、シミュレーションにより取得した。鉄道車両の台車枠などでの使用を想定した厚さ $t = 8\text{mm}$ の鋼板において、鋼板表面に存在する傾斜したきず、および種々の余盛形状を有する溶接ルート部に生じたきずの2種類を対象として、屈折角 $\theta = 70^\circ$ の横波を用いた一回反射法による斜角探傷のための2次元有限要素モデルを作成した。図9(a)に示す鋼板の表面傾斜きずモデル（以下、鋼板モデル）では、きず高さを $d = 1.76\text{mm}$ とし、表面に対する傾斜角 η を $-60^\circ \sim +60^\circ$ の範囲で変化させた。一方、図9(b)に示す溶接ルート部のきずモデル（以下、溶接モデル）は、厚さ $t = 8\text{mm}$ の鋼板表面に厚さ 15mm の部品をすみ肉溶接した構造を模している。きず高さ d は鋼板モデルと同じ 1.76mm とし、傾斜角 η は 0° で固定とした。すみ肉溶接の脚長は 8mm （等脚長）とし、溶接止端部の余盛接触角 ξ を $0^\circ \sim 90^\circ$ の範囲で15段階で変化させた。いずれの解析モデルでも、きず波形と比較するための「きずなし波形」の取得のために、きずがないモデルを作成した。モデルの要素サイズは 0.04mm 四方とした。モデルに用いた各要素の材料定数を表7に示す。



(a) 鋼板の表面傾斜きずモデル（鋼板モデル） (b) 溶接ルート部のきずモデル（溶接モデル）

図9 シミュレーションによる超音波探傷波形の取得のため2次元有限要素モデル

表7 超音波探傷の解析モデルに用いた各要素の材料定数

要素	材質	縦波音速 c_L (m/s)	横波音速 c_T (m/s)	密度 ρ (kg/m ³)
鋼板, 溶接部	鉄鋼	5900	3230	7800
探触子くさび	PMMA (アクリル)	2730	1430	1180

4.1.2 探傷波形の取得

一回反射法による斜角探傷のために、斜角探傷子の入射点からきずまでの距離が1スキップ ($= 2t \tan \theta =$ 約 44.0mm) の位置を基準として、基準位置から $\pm 15\text{mm}$ の範囲で探傷子を走査させながら周波数 5MHz の超音波を送信したときに、各位置における「きずあり」および「きずなし」の受信波形を取得した。計算には、伊藤忠テクノソリューションズ(株)製の超音波シミュレーションソフトウェア ComWAVE Ver. 11.0.0 を用いた。取得した波形の内訳を表8に示す。波形の総数は2173で、きずなし波形が636、きずあり波形が1537である。各波形は、送信から受信完了までの時刻 $0 \sim 50\mu\text{s}$ の間の9218点(約 5.424ns 間隔)における受信波振幅が収納された、 $9218 \text{ 点} \times 2 \text{ 次元}$ (時刻, 振幅)の数値データとして取得した。数値データを波形(散布図)として描画した例を図10に示す。これらは鋼板モデルの波形の例であるが、溶接モデルでは、余盛形状によってはきずエコーとの区別が難しい妨害エコーが現れる場合があった。

表 8 各解析モデルで取得した波形の内訳

	きずなし	きずあり	合計
鋼板モデル	21	922	943
溶接モデル	615	615	1230
合計	636	1537	2173

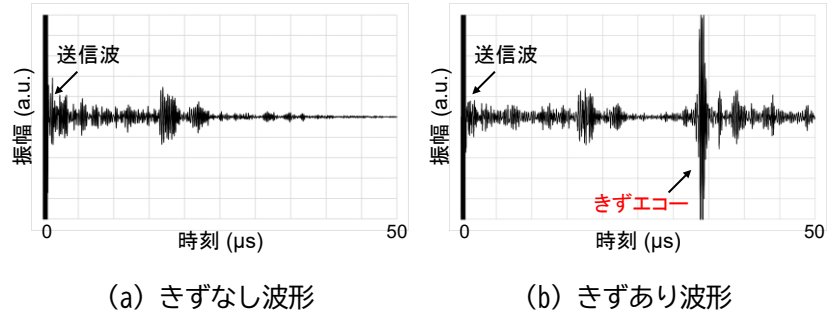


図 10 超音波シミュレーションで取得した探傷波形の例（鋼板モデル）

4.2 きず検出の手順および検出結果

4.2.1 波形の前処理

4.1.2 項で述べた総数 2173 の各波形の数値データに対して、「きずなし：0」または「きずあり：1」の正解ラベルを付した。波形データを正規化したうえで、ラベルデータとともに（学習データ）：（テストデータ）=4:1 の割合で分割し、それぞれ、機械学習モデルの学習とテストに用いた。学習データおよびテストデータは、全データにおける「きずなし」「きずあり」データの比率（636:1537）を維持したまま、鋼板モデルと溶接モデルのデータを区別せず、ランダムに分割した。

4.2.2 学習アルゴリズムの選択とモデルの最適化

Python の機械学習ライブラリである scikit-learn のユーザーガイドに示されている「アルゴリズム・チートシート⁵⁾」のうち、本研究のような「きずなし」「きずあり」の分類問題に対応可能なアルゴリズムとして、リニア SVC、*k*-近傍法、決定木、ランダムフォレストなどが挙げられる。各アルゴリズムを用いて学習モデルの性能を事前に評価した結果、本研究で用いた波形データに対してはランダムフォレストが最適と判断された。さらに、層化 5 分割交差検証の手法により、ランダムフォレストモデルに用いるパラメータを最適化し、各パラメータの値を、決定木の数 150、特徴量の数 14、木の最大深さ 13 に設定した。

4.2.3 最適化モデルによるきず検出結果

交差検証で最適化されたパラメータのうち、決定木の数と特徴量の数を維持したまま、木の最大深さを変化させたときに、テストデータにおけるきずの有無を判定したときの各評価指標の推移を図 11 に示す。ここでは参考のため、学習モデルの性能の目安となる交差検証での正解率を併せて示した。木の深さが 8 程度で各指標は概ね収束し、いずれも 97% を超える良好な成績が得られた。特に、テストデータでのきず検出の再現率は 100% を達成した。

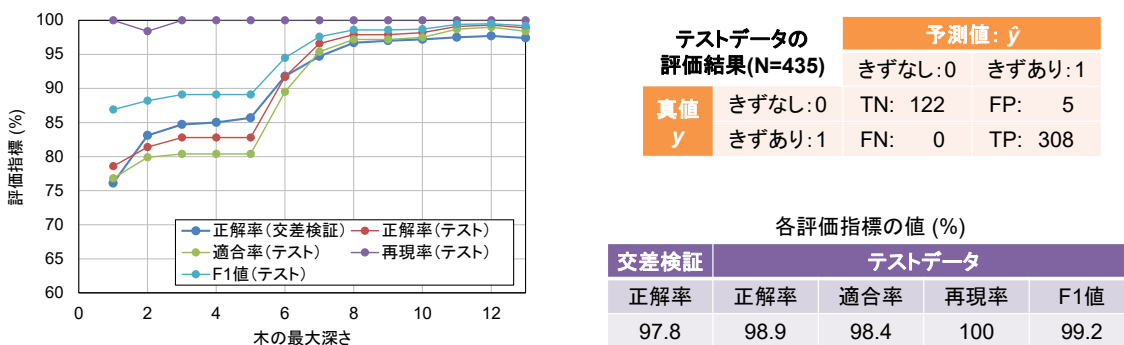


図 11 ランダムフォレストの最適パラメータで波形を学習させたときの評価指標の推移

5. 超音波探傷画像の機械学習によるきず検出

5.1 はじめに

前章では、超音波探傷の波形を数値データとして扱ったときの機械学習について述べたが、自動探傷装置や一般的なポータブル超音波探傷器を用いて取得したデータは、全波検波後の波形をキャプチャした「画像」として保存されている場合も多い。本章では、4章で用いたものと同じデータをもとに、全波検波波形として画像化したデータを学習させたモデルを用いてテストデータを判定させたときの成績を評価した。

5.2 きず検出の手順および検出結果

5.2.1 画像の作成と前処理

4.1.2 項で述べた各波形の数値データをもとに、図 12 に示すような全波検波画像を 2173 枚作成した。全波検波波形とは、波形の振幅が負の部分を折り返して（絶対値で）示した波形である。ただし、画像としての学習に不要な、縦軸、横軸の表示は省略した。超音波探傷画像の学習では、3章の磁粉探傷画像のときと同様に CNN ベースのモデルを用いるが、CNN を利用するためのプログラムの一つである Python の TensorFlow への入力に適したデータ形式に変換する必要がある。詳細は割愛するが、最終的に、画像サイズが $200 \times 200\text{px}$ で、 $0 \sim 1$ の浮動小数点数に正規化された、 $(2173, 200, 200, 1)$ 次元（画像 2173 枚 \times 縦 200px \times 横 200px \times 1ch（グレースケール））の 4 階テンソルの入力データを作成した。

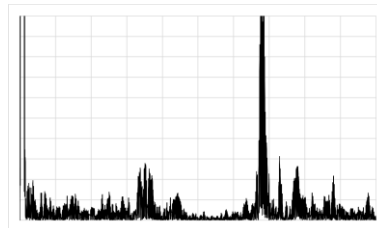


図 12 超音波探傷画像の機械学習に用いた全波検波画像の例（鋼板モデル）

5.2.2 機械学習の手順

超音波探傷画像の CNN による機械学習のため、磁粉探傷画像のときと同様に、画像データを学習用の訓練データと検証データ、およびテストデータの 3 種類にランダムに分割した。分割の割合は $64 : 16 : 20$ とし、各データにおける「きずなし」「きずあり」の比率は、データ数が整数の範囲で元の比率（ $636 : 1537$ ）を維持した。超音波探傷画像の学習に用いた CNN モデルの構成例を図 13 に示す。図 5 に示した磁粉探傷画像用のモデルよりもややシンプルで、この例では、畳み込み層 (Cv)、プーリング層 (Pl) が各 2 層 ((Cv-Pl) $\times 2$ と呼ぶ) で構成されている。これ以外に、(Cv-Pl) $\times 3$ や (Cv-Cv-Pl) $\times 2$ のような構成の CNN モデルについても検討した。

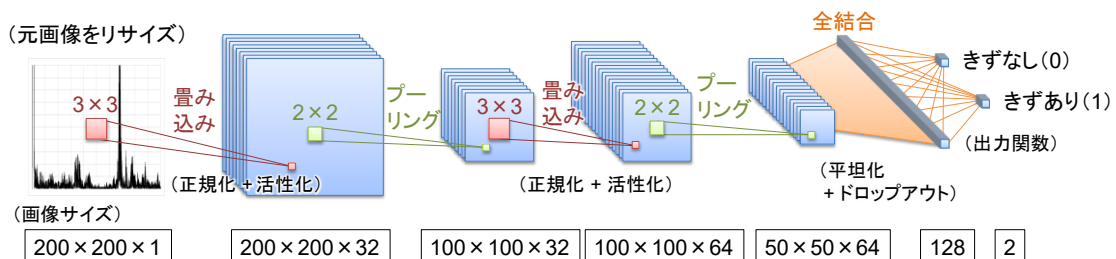


図 13 超音波探傷画像の学習に用いた CNN モデルの構成例 ((Cv-Pl) $\times 2$ モデル)

5.2.3 学習結果およびテストデータでのきず検出結果

CNN モデルによる学習の例として、(Cv-Cv-PI)×2 で構成されたモデルでの学習結果を図 14 に示す。20 エポック程度まで学習が安定しなかったが、それ以降は安定に推移した。学習終了時の正解率は、訓練データ、検証データともに 100%で、誤差も十分小さな値であった。また、テストデータにおけるきずの有無を判定した結果、すべて正解（正解率 100%）であった。

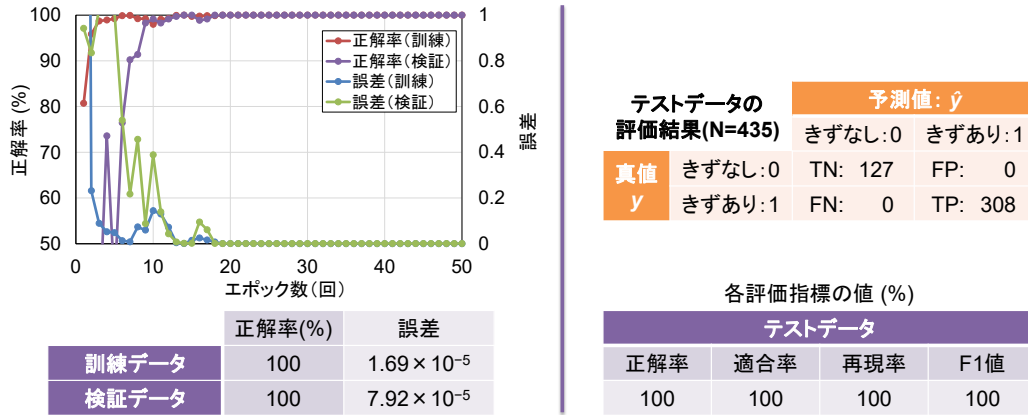


図 14 超音波探傷画像の CNN モデル(Cv-Cv-PI)×2 による学習結果

6. まとめ

台車部品の探傷を人手に依らず自動化するための要素技術として、台車枠の磁粉探傷や超音波探傷で得られた結果に対して機械学習を適用し、磁粉探傷画像あるいは超音波探傷波形からきずを自動的に検出する手法について検討した。

磁粉探傷に関しては、溶接試験片の磁粉探傷画像を分割して作成した多数のきずありおよびきずなし画像を CNN で機械学習させた。テスト用画像の評価では、分割サイズに対応する領域ごとにきずの疑いがある箇所を学習済みモデルを用いて検出し、それらが複数つながっていれば「きず」と判定する手法を用いることで、溶接部の表面きずを概ね 70%の成績（再現率あるいは適合率）で検出できた。超音波探傷に関しては、台車枠の探傷を想定した波形を「時刻歴データ」として機械学習させたモデルを用いた場合、溶接部の内部きずを 95%以上の成績で検出できた。同じ波形を全波検波波形として画像化したデータを CNN で機械学習させたモデルを用いた場合でも、同等の成績できずを検出できた。

構築した機械学習モデルおよび手法を台車部品の検査に適用することで、まずは、磁粉探傷画像や超音波探傷波形からきずの有無を判断する際の補助的な用途として活用することが可能である。今後は、鉄道事業者の車両検修現場で取得した実データを学習させてきず検出精度の向上を図り、探傷装置のロボット化を含めた探傷プロセス全体の自動化につながるよう研究を進める。

文 献

- 1) 牧野一成：台車枠の表面きずを効率的に検査する，RRR，Vol.65，No.11，pp.18-21，2008
- 2) 北村未来登：台車枠磁粉探傷検査の改善，R&M，Vol.29，No.9，pp.24-26，2021
- 3) 日本非破壊検査協会：第 3 回 NDE4.0 シンポジウム講演概要集，2025
- 4) 例えば，齋藤康毅：ゼロから作る Deep Learning—Python で学ぶディープラーニングの理論と実装，オライリー・ジャパン，2016
- 5) Scikit-learn User Guide, "Choosing the right estimator", https://scikit-learn.org/stable/machine_learning_map.html (参照日：2026 年 5 月 19 日)

鉄道総研報告
RTRI REPORT

一本リンク式牽引装置による車両の異常検知手法

嵯峨 信一* 飯田 忠史** 中橋 順一**

A Method for Detecting Vehicle Abnormality Using a Single-Link Traction Device

Shinichi SAGA Tadanobu IIDA Junichi NAKAHASHI

To detect abnormalities in railway vehicles, many sensors (such as for acceleration and temperature) are installed on the car body and bogie. However, the growing number of these sensors escalate installation and operation costs. Therefore, there is a critical need to achieve abnormality detection with high accuracy. To address this issue, we investigated an abnormality detection method based on the forces acting on the traction device, with the aim of improving detection performance while minimizing the number of sensors. In this paper, we report the results of tests conducted using actual vehicles as well as dynamo bench tests using actual full-scale bogies.

キーワード：ボルスタレス台車，一本リンク，牽引力，歪ゲージ，曲率，回転周波数，WN 継手

1. はじめに

新幹線電車に代表される高速鉄道は、速達性や大量輸送能力に加えて省エネルギーなど環境面での長所を併せ持ち、社会の持続的発展に貢献する輸送形態であることから、今後も国内外での発展が期待される。

これまで我が国では、高速走行時における安全性と快適性を両立しながら速度向上を達成してきた経緯がある。しかし、2004年の新潟県中越地震¹⁾と2016年の熊本地震²⁾ならびに東日本大震災の余震とみられる2022年の福島県沖地震³⁾では、編成中で多くの輪軸が脱線するなど従来の事例を超える事象が生じた。

今後の鉄道における技術開発では、想定すべき異常の範囲が拡大し、如何にそれらを検知できるかが重要であると考えられる。一方で、従来の開発方式のように、想定する異常を検知するためにセンサ数を増やして高機能かつ複雑なシステムを構築する方法では、導入時や運用時での負担が懸念される。

そこで、本研究では、将来の自動運転に資する状態監視手法の構築を視野に、新幹線車両のボルスタレス台車に取り付けられている牽引装置のひとつである一本リンク(図1)に作用する力を用いて、車両の挙動を検出する手法を検討し、センサ類の最小化(ダウンサイジング)を図りながら異常検知の機能向上および導入・運用コストの低減を目指して取り組んできた⁴⁾。本報告は、これらの成果をまとめたものである。

2. センサの選定

一般的な加速度センサと歪センサの主な性質の比較を表1に示す。加速度センサは、市販品の種類が豊富で入手しやすく、設置や測定が比較的容易であることから、使用実績が多い。鉄道車両においても、実績のある加速度センサと空気ばねの圧力センサ(重大インシデント事象⁵⁾の調査でその対角内圧差が用いられた)を組み合わせた監視装置⁶⁾が実用化されている。一般に、加速度を積分することにより速度や変位などを検出できるメリットがある反面、複数物体から伝達する様々な振動(測定対象物およびセンサ本体の固有周波数、特に回転体では動的に変化)の影響を受けるため、周波数解析のような高度な解析技術を必要とし、異常検知の判定ロジックが複雑化する場合がある⁷⁾⁸⁾。

* 車両技術研究部 プレーキシシステム研究室

** 車両技術研究部 車両運動研究室

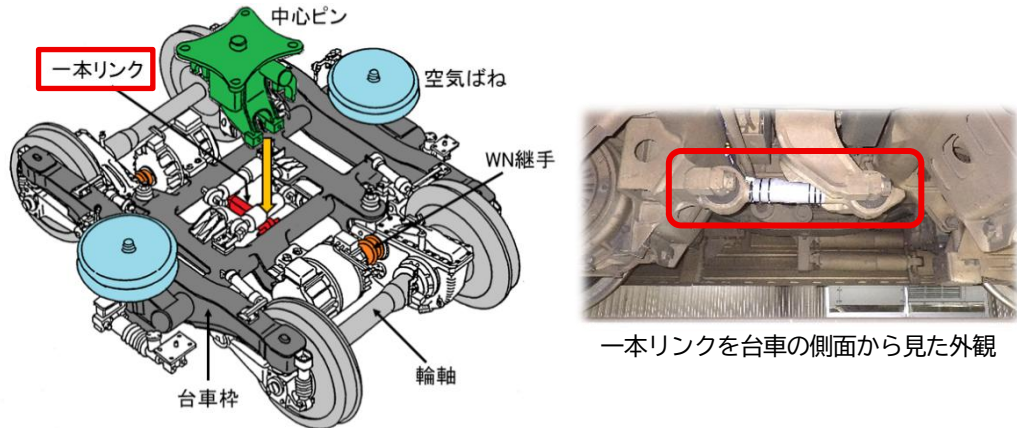


図1 新幹線台車の牽引装置（一本リンク）

鉄道の台車（約7トン）や車両（約50トン）のような重量物において、損傷・破壊あるいは動揺・転覆・脱線などが生じる際には、相当の内外力が作用することになる。そこで、本研究では歪ゲージをセンサとして用いることを検討した。歪ゲージは物体に生じる歪から力（応力）を測定する歴史のある方法である。具体的には、安価で汎用的な抵抗線式箔ゲージを一本リンクの幹部に貼り付ける方法で、センサとしては1台車あたり1箇所に集約されるため、ダウンサイジングが図れる。加えて、これまで牽引力（制動時のブレーキ力を含む）の評価などで実績⁹⁾のある手法を応用することとした。

この手法を用いて実際に地震発生時（八戸駅、震度5弱）に測定された牽引力の事例を図2に示す。これは地震の初期微動（P波）警報を受けて架線が停電し、列車がすみやかに空制（摩擦）ブレーキで停止した際の測定チャートである。牽引力は停止直後に再び増大して正弦波状に変動しているが、このとき、軌道と車両はともに横方向（まくらぎ方向）に揺れていたことから、前後方向（レール方向）に働く牽引力そのもの以外の物理量を捉えている可能性が考えられる。

鉄道車両ダイナミクスを解析する数値シミュレーションはこれまでに数多く報告¹⁰⁾され、その力学モデルも種々提案されているなか、一本リンクは簡素な2次元モデルで表され、作用する力は前後方向（レール方向）に限られており、新たな現象の予測は困難である。そこで、一本リンクに作用する力について、実車両で詳細に調査することとした。

表1 加速度センサと歪センサの性質比較

センサ	方式	応答周波数	長所	短所
加速度	圧電式	5~15kHz 程度	汎用性高 高周波向き	高価、電氣的ノイズ重畳 固有周波数の影響
	半導体式	DC~3kHz 程度	安価、汎用性高	電氣的ノイズ破損、固有周波数の影響
	歪式	DC~300Hz 程度	低周波向き	固有周波数の影響
歪	抵抗線式	DC~数百 kHz	安価、汎用性高 荷重計測（応力）	センサ取付が煩雑
	半導体式	DC~数百 kHz	分解能高 荷重計測（応力）	センサ取付が煩雑 曲面体への取付難
	磁歪式	DC~数百 kHz	高精度、非接触 荷重計測	高価、耐衝撃性低 温度の影響、磁界の影響

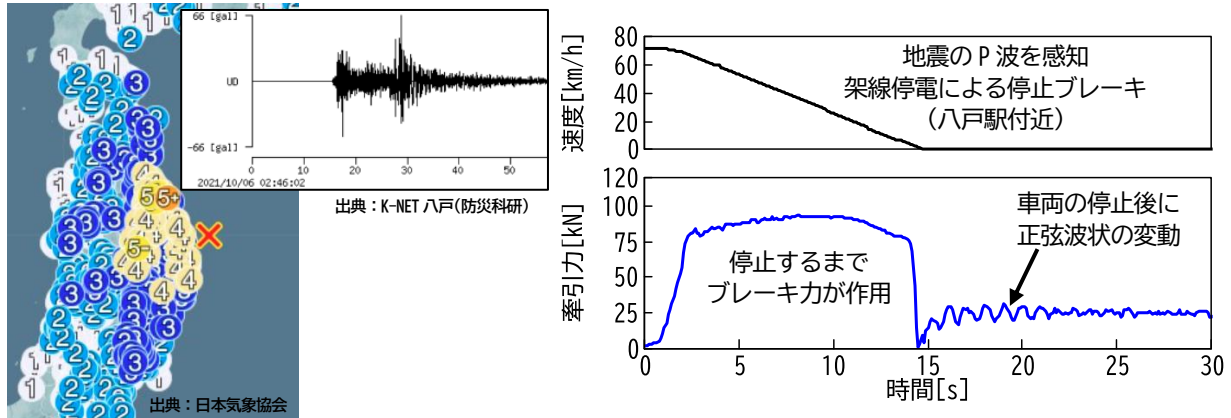


図2 地震発生時における牽引力の測定例（八戸駅，震度5弱）

3. 牽引装置に作用する車両挙動の検出

車両挙動によって一本リンクに作用する力を調査するにあたって，本線走行する実車両の一本リンク幹部の中心付近に4種類の歪ゲージ（120Ωまたは350Ωの一般応力用箔ゲージ，共和電業）を貼り付けた．歪ゲージを施工した一本リンクの外観を図3に示す．前後方向および幹部まわりのねじり方向は4アクティブゲージ法を，上下曲げ方向および左右曲げ方向は2アクティブゲージ法を適用した．これらをインバータノイズ耐性の高い動歪測定器（DPM-952A，共和電業）に接続し，歪を長期間にわたりデータロガー（サンプリング周波数は500Hz）に収録した．

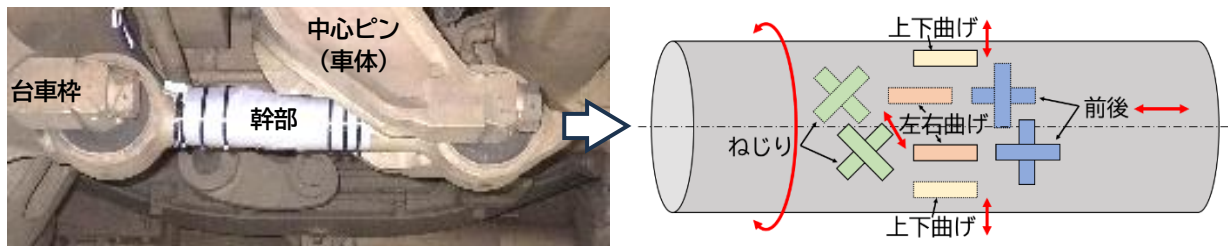


図3 歪ゲージを施工した一本リンクの外観（歪ゲージは中心軸を挟んで180度反対側に貼付）

3.1 前後方向の歪

前後方向（レール方向）に発生する歪について，ローパスフィルタ（以下，LPF）で処理した後に実効値を求め，さらに文献⁹⁾の方法により荷重（牽引力）に換算した．図4は車両が速度330km/hから電制ブレーキB7ノッチ（B7N）で停止し，その後力行10ノッチ（P10N）で加速した際の荷重を車両の制御指令値と比較したものである．減速（制動）時，加速（力行）時ともに牽引力はいずれも制御指令値と良く一致した．

一方，ハイパスフィルタ（以下，HPF）で処理した後に周波数解析を行った結果，輪軸の回転周波数が顕著に現れることが分かった（図5）．これは同一台車の各輪軸における質量アンバランスに起因する前後加振力の僅かな差異が現れた影響と考えられる．

台車枠や軸箱に取り付けた加速度センサでは，分岐器やレールの継ぎ目を車両が通過した際に生じる高調波の振動外乱を計測値に含むことが避けられないが，一本リンクはピン付ゴムブッシュを介して車体および台車に締結されることから，振動と電気的な影響の軽減が期待でき，第1卓越周波数を抽出することで回転系の異常を検出できる可能性が考えられる．

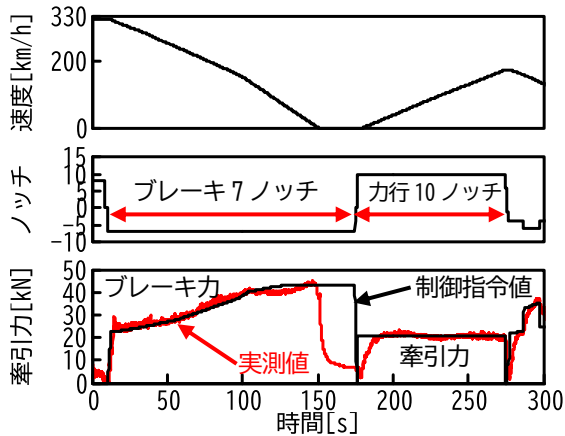


図4 制動時および力行時の比較評価例

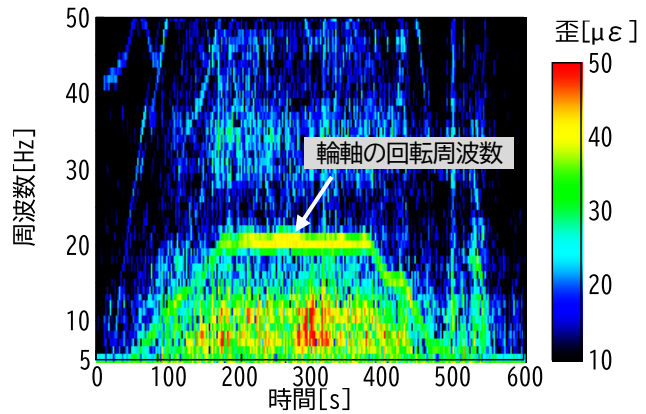


図5 周波数解析の結果例（最高速度 200km/h）

3.2 左右曲げ方向の歪

レールと車輪の相対角度を表すアタック角は、曲線通過性能に関係することが知られている。特に、横圧は脱線係数に強い影響を及ぼすことから、走行中のアタック角を常時把握することが望ましい。しかし、営業車両の台車に測定装置¹¹⁾を装備しながらデータを蓄積・分析することは困難である。そこで、アタック角に準ずる物理量として台車の旋回運動を表すヨー角速度に着目した。

台車枠の中心付近に取り付けた6軸モーションセンサ（3軸加速度：前後・左右・上下、3軸角速度：ピッチ角速度・ロール角速度・ヨー角速度）と、一本リンクの左右曲げ方向（まくらぎ方向）に発生する歪（LPF処理後）を比較した。その結果、ヨー角速度と左右曲げ歪に強い相関（相関係数 0.81）がみとめられた（図6(a)）。この関係を利用して左右曲げ方向の歪から台車ヨー角速度を求め、さらに式(1)を用いて曲率 φ [1/m]が得られる（図6(b)）。これを線路の設計曲率と照合することにより、台車挙動の異常や線路の異常を検知できる可能性がある。ここで、 γ_{yaw} は台車ヨー角速度[deg/s]、 v は車両速度[km/h]である。

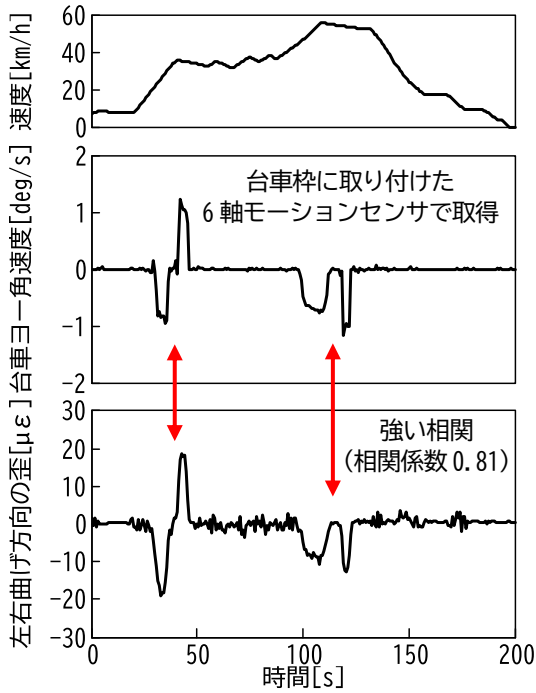
$$\varphi = \{(3.6 \times \gamma_{yaw}) / v\} \times (\pi / 180) \tag{1}$$

また、台車枠のヨー角速度と車輪の変動横圧（横圧の変動量）に高い相関性がみとめられる知見¹²⁾を踏まえ、台車枠のヨー角速度と変動横圧の関係をシミュレーションにより推定した。シミュレーションにおける曲線半径R[m]と速度の条件は、R=600のとき110km/h、R=1000のとき130km/h、R=2000のとき180km/h、R=3000のとき220km/h、R=4000のとき260km/hとした。図6(c)に示した推定結果によると、実測した左右曲げ方向の歪と推定した変動横圧との間に強い相関（相関係数 0.98）がみとめられたことから、左右曲げ方向の歪に許容範囲などを閾値として設けることにより、変動横圧の増大傾向を捉えられる可能性がある。

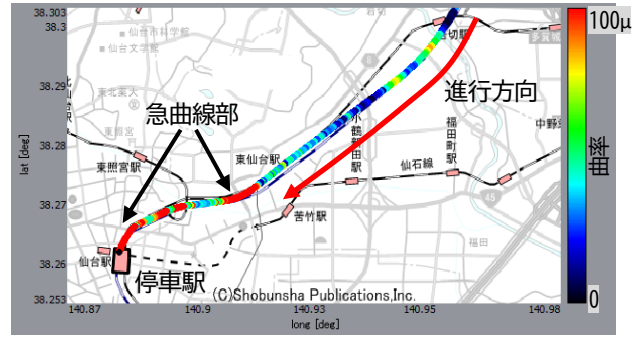
一方、上下曲げ方向（鉛直方向）に発生する歪について調べた結果、前後方向の歪と左右曲げ方向の歪に加えてねじり方向の歪が複雑に重畳しており、関連のある車両挙動は検出困難であることが分かった。

3.3 幹部まわりのねじり方向の歪

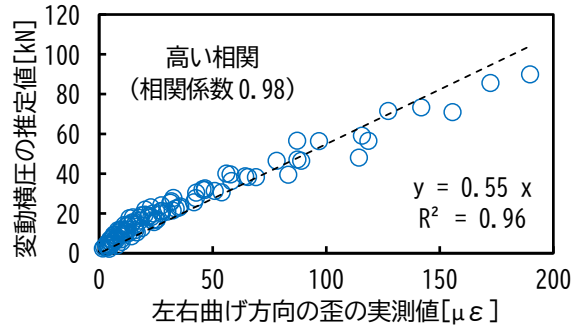
車体と台車の間には荷重を受けながら車体と台車間の相対変位を一定程度の範囲で許容する空気ばねが搭載されている。その優れた特性により生まれたボルスタレス台車¹⁰⁾は、車両の速度向上に大きく貢献してきた。また、近年では空気ばねを用いた車体傾斜技術¹³⁾が実用化され、振りばり方式に比べて傾斜角は小さいが台車を軽量化しつつ、乗り心地を適正に保ちながら曲線通過速度の向上を図っている。



(a) 左右曲げ方向の歪と台車ヨー角速度の関係



(b) 曲率の換算結果 (駅停車)



(c) 左右曲げ方向の歪と変動横圧の推定結果

図6 左右曲げ方向の歪による検出結果例

空気ばねには、そのパンクや輪重アンバランスなどを常時監視するシステムがあるが、車体支持のほかにはブレーキ制御で用いる応荷重センサとしての役割もあり、検知圧力にはリミッタ（上限，下限）が設けてある。一方、車体傾斜制御には、姿勢角を検出するための空気ばね高さセンサが搭載されている。これらはいずれも制御用であり、脱線などの異常状態の把握を目的としていない。また、センサ故障時には測定・監視できないことから、実際に脱線などが生じた際の異常状態の把握・判別には利用できない可能性がある。

このため、車両が脱線する際の挙動として挙げられる車体～台車間の顕著な相対変位¹⁴⁾に着目した。相対変位の主なイメージ例を図7(a)に示す。車体傾斜制御の有無に加え、車体あるいは台車のロール運動（地震、横風による車両転覆、亀裂などによる台車枠の形状不整、浮き上がり、ロッキングなど）が想定され、空気ばね高さの左右差が生じる際に相対変位が増大（空気ばね自身も大変位）し、併せて一本リンクのねじり歪も増大すると考えられる。そこで、車体傾斜制御を行う走行車両の台車について、空気ばね高さセンサの計測値の左右差と一本リンクに発生する幹部まわりのねじり方向の歪（LPF 処理後）の関係を調査したところ、強い相関（相関係数 0.88 以上）がみとめられた（図7(b)）。

以上の結果から、通常の走行では生じない顕著な車体～台車間の相対変位を一本リンクに発生する幹部まわりのねじり歪で検知できる可能性があり、許容範囲を設けたうえで 3.2 項に示した変動横圧の推定値と組み合わせることにより、幅広い速度域で台車逸脱あるいは脱線挙動を捉えられる可能性がある。また、車体傾斜制御を有しない車両、すなわち空気ばね高さセンサを搭載していない車両で、一本リンクを装備していれば本手法が適用できると考えられる。

なお、実用化されている空気ばね圧力を用いた異常検知方法¹⁵⁾は、輪重バランスの不均衡が脱線のリスクを高めるとする知見を踏まえ、空気ばね圧力を輪重の代替量として扱うものである。そこで、空気ばね圧力に対するねじり歪および空気ばね高さの関係を各台車と各部位で調査した。いずれも空気ばねの非線形特性が顕著にあらわれ、空気ばね圧力をねじり歪や空気ばね高さで代用することは困難と考えられる。

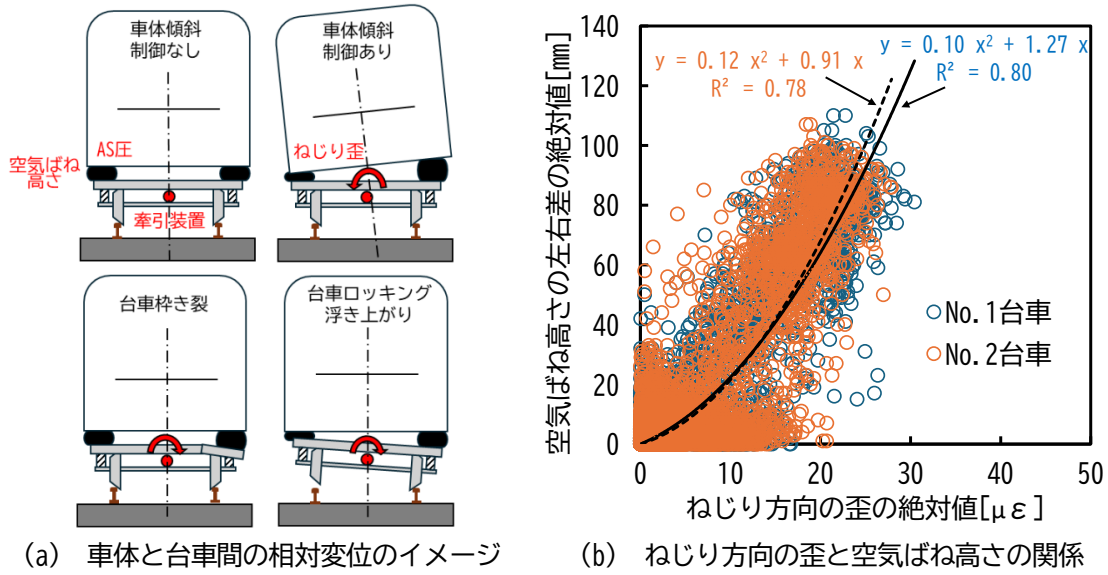


図7 幹部まわりのねじり方向の歪による検出結果例

4. 異常検知手法の検討

第3章で示した車両挙動の検出手法および異常の検知手法について検討を行った。検討にあたっては、信号処理の負荷軽減を図ることにより運転台のモニタ装置に実装できることを前提とした。営業線を走行する実車両に試作した簡易モニタ装置を長期間搭載し、取得データから図8に示すフローを考案した。

車両挙動の検出手法は、対象とする車両挙動の周波数帯域を考慮したフィルタを介して抽出した歪の実効値あるいは絶対値から物理量へ換算する係数をあらかじめ求めておき、周期0.1秒で換算した。次に、異常の検知手法は、検出した車両挙動の物理量（以下、便宜的に実測値と呼ぶ）と、基準となる車両情報（制御指令値や編成の速度など）との比である無次元量で異常判定した。たとえば、±20%を基準に対する許容範囲とすると2つの閾値（上限，下限）を設けて、それぞれ不足（0.8未満）、正常（0.8以上1.2未満）、過大（1.2以上）に区分することができ、これらを速度5km/h以上（戸閉め保安装置などでも用いられる）で行うことで、編成中の各台車における判定を単純化しながら信号処理の負荷軽減を図るようにした。

その結果、速度と力行および制動のリアルタイム判定が概ね可能であった。ただし、左右曲げ方向の歪から推定する曲率やねじり方向の歪から推定する相対変位については、基準となる情報を車両からリアルタイムで取得することが困難であったため、現時点では閾値で判定することとした。

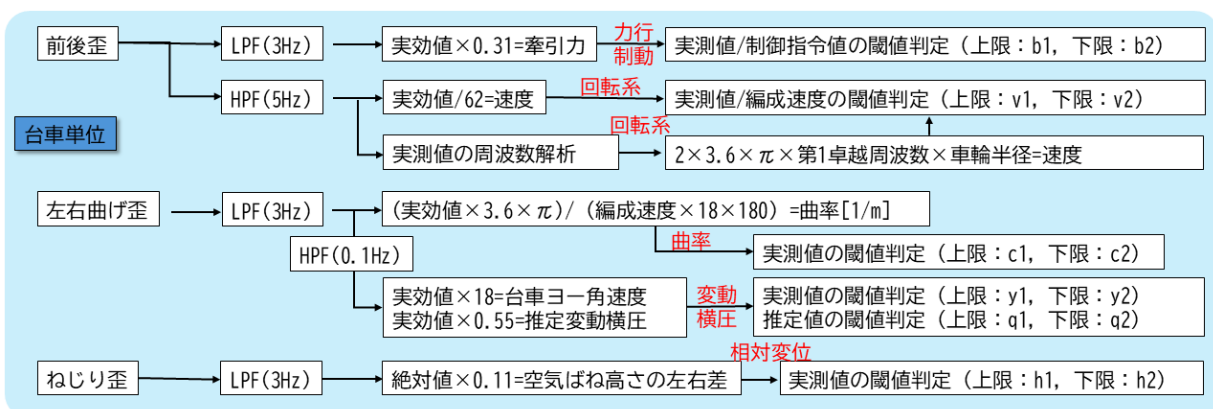


図8 車両挙動の検出手法および異常検知手法（閾値は記号で表した）

5. 異常検知手法の検証

5.1 力行時および制動時の異常検知（実車両）

営業線を走行する実車両の力行時および制動時の車両挙動について、考案した異常の判定手法を検証した。判定の閾値を±20%とした結果を図9に示す。力行時のB号車ではモータフェールに起因した牽引力の急激な低下がみられ、不足と判定した（図9(a)）。また、制動時のB号車では滑走制御のユルメ動作に起因したブレーキ力の低下がみられ、不足と判定した（図9(b)）。なお、ブレーキの場合は基準値に対してより安全となるように余力を持たせる設定とするため、過大と判定されやすい傾向はその結果である。なお、停止間際の傾向は、電制ブレーキに空制補足（摩擦力）が付加された影響によるものである。

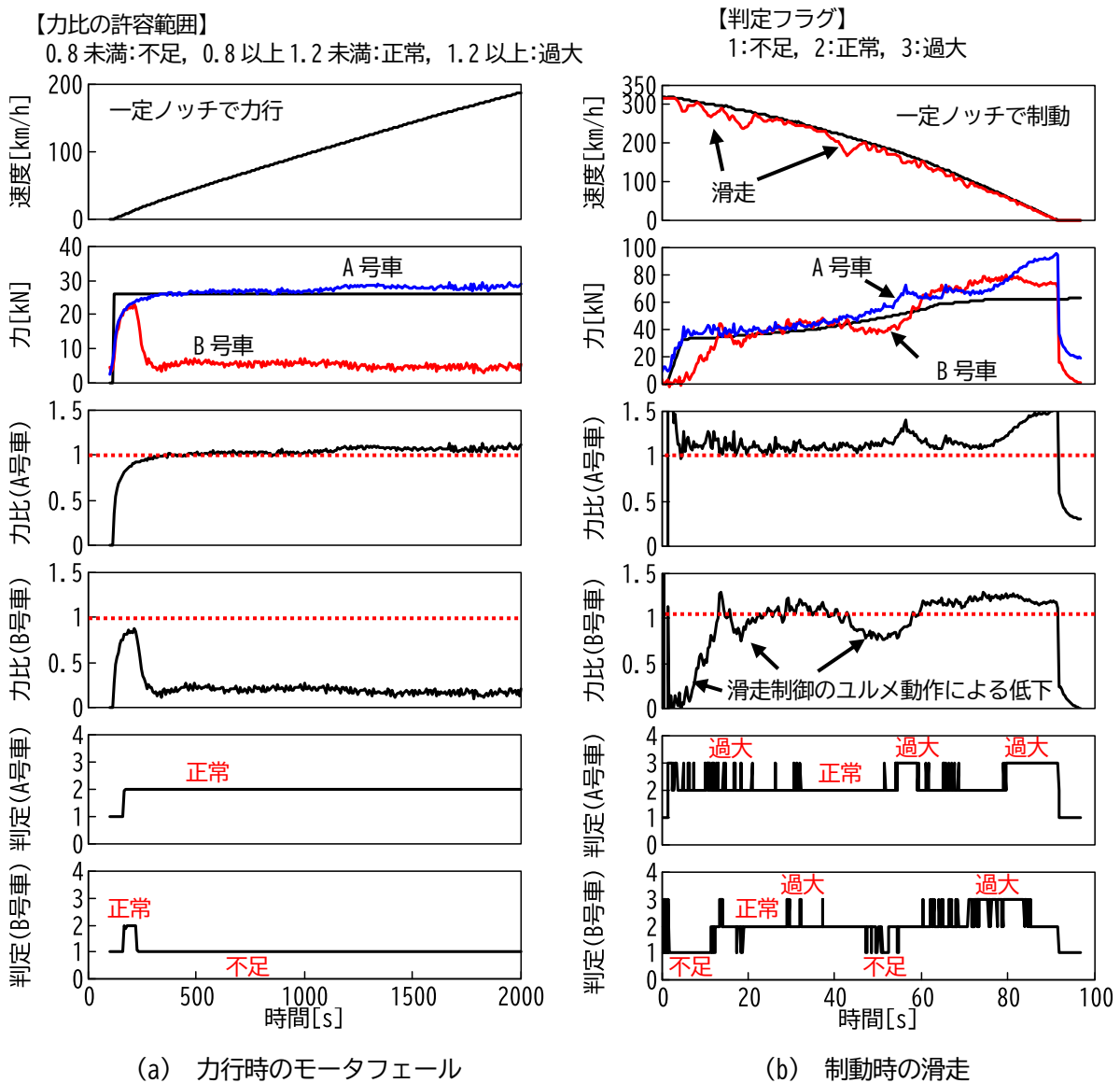


図9 実車両の走行試験における異常検知の検証例（判定基準±20%）

5.2 回転系の異常検知（実台車）

回転系の異常の具体例としては、制動時の固着に伴う車輪踏面のフラット、車輪踏面の円周方向における偏摩耗¹⁶⁾、車軸用軸箱（軸受）の破損および歯車装置（箱、歯車、軸受）の破損などが挙げられる。このうち、2010年と2017年に発生した新幹線における歯車装置の破損⁵⁾では、いずれもモータの駆動力を歯

車装置に伝達する WN 継手に過度の負荷が作用し、相当な発熱による変色が見られた。そこで、WN 継手の歯面が損傷あるいは欠損した際に生じる動的なアンバランスを WN 継手の回転異常と想定し、実台車でこれを模擬した台上回転試験を実施し、異常検知手法を検証した。

回転異常を模擬する方法として、長尺加工した特殊な継手の締結ボルトを製作し、さらにナット数を増やすことで質量を調整できるようにした。全 6 本の締結ボルトのうち隣り合う 3 本をこれらに交換して動的なアンバランス質量を人工的に作り出した (図 10)。供試台車の歯車装置のギヤ比は 3.04 で、走行条件は最高速度 315km/h、台車の荷重条件は満車相当とし、台車のモータで輪軸を駆動するようにした。

一本リンクの前後方向における歪の高周波成分を周波数解析した結果を図 11 に示す。正常品では輪軸 (車輪) の 1 次周波数が、異常模擬品では輪軸に加えて WN の 1 次 (ギヤ比倍) および 2 次の周波数がそれぞれ顕著にあらわれている。これらの動的に変化する周波数を追尾しながら抽出し、検知するには専用の周波数解析装置が必要になってしまう。そこで、第 1 卓越周波数から換算した速度、演算処理の負荷軽減が見込まれる実効値から換算した速度を用いた評価を行った。その結果を図 12 に示す。

図中の「換算速度 (周波数)」は第 1 卓越周波数と車輪径を基に速度換算したもので①と記した。一方、図中の「換算速度 (実効値)」は歪の実効値から係数を掛けて速度換算したもので②と記した。200km/h を超える速度域に着目し、①および②をそれぞれ編成速度に相当する軌条輪の周速度で除した比を求めると、いずれも正常品では概ね 1 倍程度を、異常模擬品では 1 倍を超過する値を示した。また、判定時に過不足が反転した回数を比べると、いずれも「判定 (実効値)」の方で回数が少なく安定した傾向を示した。

以上の結果から、歪の実効値を用いた異常検知手法は、演算処理の面と必要とする装置の費用面で負荷の大きい周波数解析装置に代わって、安価で簡便に異常を検知・判定できる可能性があることが分かった。

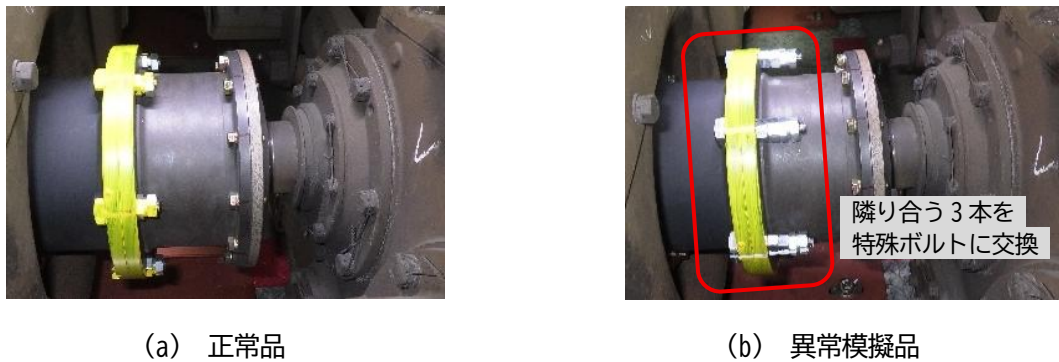


図 10 WN 継手の外観

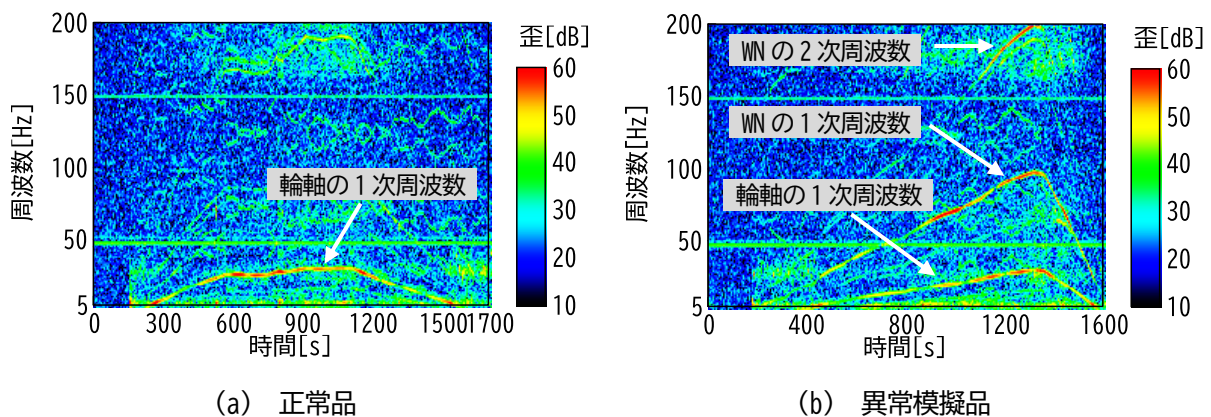


図 11 周波数解析の結果例 (歪の 0dB を $1 \times 10^{-3} \mu\epsilon$ として定義)

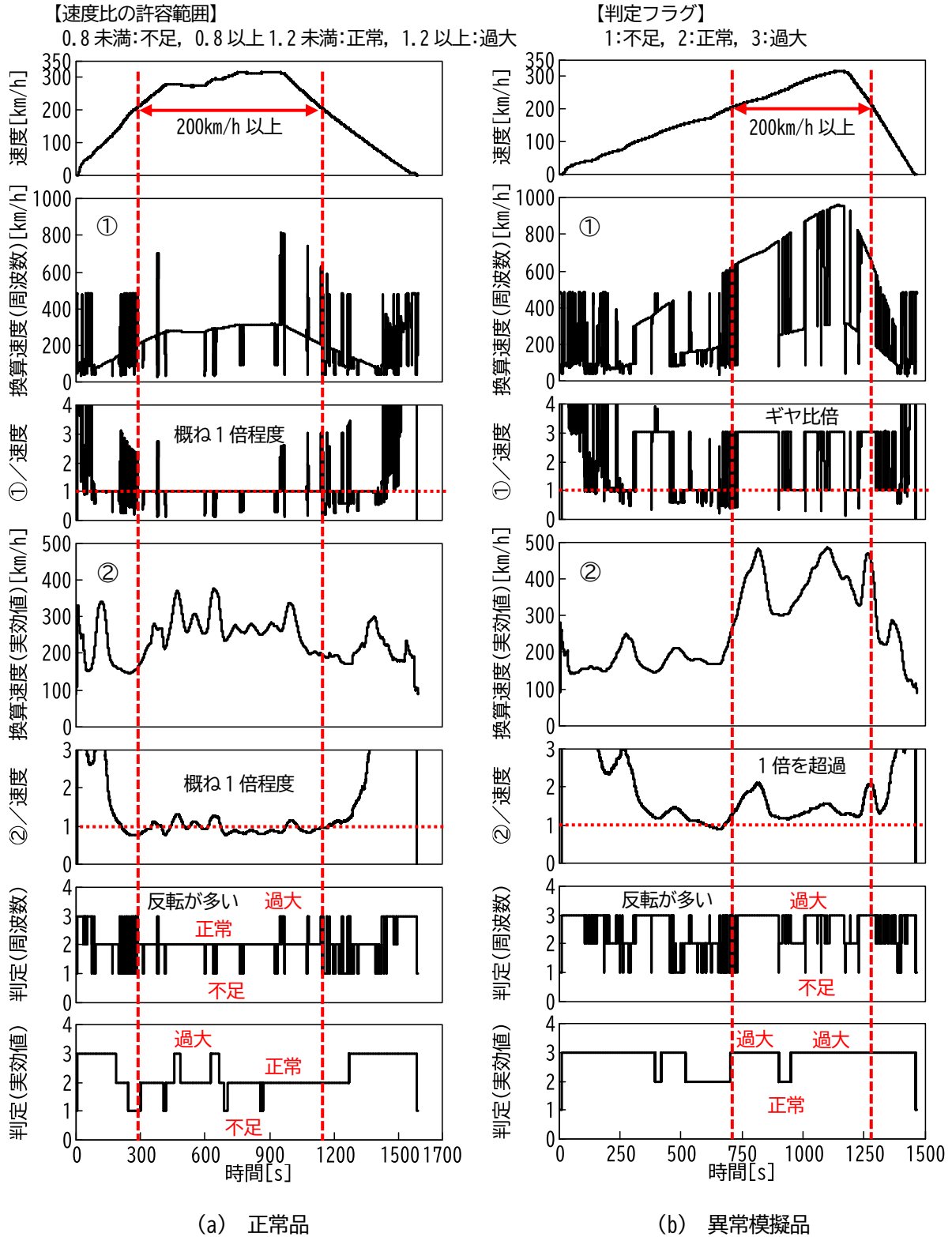


図12 実台車の台上試験における異常検知の検証例 (判定基準±20%)

6. まとめ

本研究では、将来の自動運転に資する状態監視手法の構築を視野に、新幹線車両のボルスタレス台車に取り付けられている牽引装置のひとつである一本リンクに作用する力を用いて車両挙動を検出し、力行時および制動時における牽引力の異常検知や輪軸あるいは駆動装置の回転時における異常検知の手法を検討

し、センサ類の最小化を図りながら異常検知機能の向上および導入・運用コストの低減を両立する手法を考案した。得られた知見は以下の通りである。

- (1) 一本リンクに発生する前後方向の歪の低周波数成分を用いて、力行時の牽引力および制動時のブレーキ力を検出できること、考案したロジックにより異常を検知できることが分かった。
- (2) 一本リンクに発生する前後方向の歪の高周波数成分を用いて、輪軸の回転周波数が検出できること、考案したロジックにより WN 継手の回転系の異常を検知できることが分かった。
- (3) 一本リンクに発生する左右曲げ方向の歪を用いて、台車ヨー角速度や線路曲率を検出できること、車輪の変動横圧の増大傾向を捉えられる可能性があることが分かった。
- (4) 一本リンクに発生する幹部まわりのねじり方向の歪を用いて、車体と台車間の相対変位を検出できることが分かった。

今後は、施工性や耐久性を向上した歪ゲージの開発やセンシングと判定を行う装置などの仕様検討を進める。将来的には、実車両に試行搭載して得られた長期間のモニタリングデータを解析し、判定ロジックの策定や検知性能の検証および深度化を図っていく。

本研究について、共同で特許出願を行った東日本旅客鉄道株式会社の関係者に厚くお礼を申し上げる。

文献

- 1) 航空・鉄道事故調査委員会：東日本旅客鉄道株式会社上越新幹線浦佐駅～長岡駅間列車脱線事故，鉄道事故調査報告書，RA2007-8-1，2007，<https://www.mlit.go.jp/jtsb/railway/rep-acci/RA2007-8-1.pdf>（参照日：2023年10月20日）
- 2) 運輸安全委員会：九州旅客鉄道株式会社九州新幹線熊本駅～熊本総合車両所間列車脱線事故，鉄道事故調査報告書，RA2017-8-2，2017，<https://jtsb.mlit.go.jp/railway/rep-acci/RA2017-8-2.pdf>（参照日 2023年10月20日）
- 3) 運輸安全委員会：東日本旅客鉄道株式会社東北新幹線列車脱線事故，鉄道事故調査報告書，RA2024-1-1，2024，<https://www.mlit.go.jp/jtsb/railway/rep-acci/RA2024-1-1.pdf>（参照日 2024年3月28日）
- 4) 嵯峨信一，飯田忠史，中橋順一，藤田晋平，佐藤信吾，佐藤康頼，北村賢一，砂澤作司：牽引装置を用いた走行車両の異常検知に関する研究（第2報），第31回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集（J-RAIL2024），SS1-3-4，2024
- 5) 運輸安全委員会：西日本旅客鉄道株式会社東海道新幹線名古屋駅構内車両障害，鉄道重大インシデント調査報告書，RI2019-1-1，2019，<https://www.mlit.go.jp/jtsb/railway/rep-inci/RI2019-1-1.pdf>（参照日 2023年10月20日）
- 6) 東日本旅客鉄道株式会社：台車モニタリング装置，JR 東日本ニュース，2020，https://www.jreast.co.jp/press/2020/20200707_ho04.pdf（参照日 2023年10月20日）
- 7) 大庭拓也：新幹線台車の状態監視に関する研究，新潟大学大学院自然科学研究科博士論文，<https://nigata-u.repo.nii.ac.jp/records/5263>（参照日 2023年10月20日）
- 8) 篠原嵩征，松橋克幸，畑弘敏，石田陽士，内田好徳，三須弥生：新幹線向け脱線検知機能の開発，JR EAST technical Review, No.74, pp.29-34, 2025
- 9) 嵯峨信一，宮部実，川村淳也，杉田裕伸，竹間克俊：一本リンク牽引力を用いたブレーキ性能評価手法，鉄道総研報告，Vol.29, No.2, pp.23-28, 2015
- 10) たとえば，日本機械学会編集：鉄道車両のダイナミクスとモデリング，日本機械学会，2017
- 11) 片折暁伸，土井賢一，飯島仁，桃崎秀二，堀岡健司：アタック角連続測定装置の開発と測定結果，JR EAST Technical Review, No.35, pp.50-53, 2011
- 12) 飯田忠史：台車挙動測定による走行安全性評価手法，鉄道総研報告，Vol.34, No.5, pp.23-28, 2020
- 13) 山田忠：鉄道車両の空気ばね式車体傾斜装置，計測と制御，第56巻，第2号，pp.123-126, 2017
- 14) 宮本岳史：地震をかわす車両の技術，RRR, Vol.68, No.4, pp.30-35, 2011
- 15) 松橋克幸，畑弘敏，斎藤憲司，飯島仁，土井賢一，安田陽一：輪重バランスの異常状態を検知する装置の開発，JR EAST Technical Review, No.66, pp.34-39, 2021
- 16) 末木健之，北川敏樹，栗田健，杉田裕伸：構造物騒音に対する偏摩耗車輪の影響評価と偏摩耗量推定手法，鉄道総研報告，Vol.31, No.9, pp.41-46, 2017

水分移動を考慮したひずみ解析に基づく
PC 箱桁橋りょうの長期変形予測

橋本 龍* 田中 伸明** 渡辺 健*

Long-Term Deformation Prediction of PC Box Girder Bridges
Using Strain Analysis Incorporating Moisture Diffusion

Ryu HASHIMOTO Nobuaki TANAKA Ken WATANABE

In concrete structural design, shrinkage and creep are commonly evaluated using prediction formulas that predict these properties based on concrete mix proportions and climatic conditions, and these formulas are applied to analyses such as the long-term deflection of PC box girders. Although these methods can predict deflection with relatively high accuracy through fiber analysis, they rely on simplified assumptions for drying conditions and therefore cannot sufficiently account for detailed environmental conditions. The authors developed a strain analysis program that focuses on internal moisture behavior in concrete. By applying the analytical results to fiber analysis, it was shown that factors such as ambient relative humidity and water exposure on structural members significantly influence the long-term deformation of PC box girders.

キーワード：コンクリート構造，水分移動，乾燥収縮，クリープ，長期変形

1. はじめに

コンクリート構造物の設計分野では、コンクリートの収縮やクリープに起因した変状に対して、一般に配合や気象条件を変数とした収縮・クリープひずみ算定式を用いて照査される¹⁾。この算定式を適用した構造解析として、PC 箱桁の断面内収縮差に伴う長期たわみの算定方法が示されている²⁾。本手法は、上床版、側壁、下床版の部材厚に基づき算出した収縮ひずみをファイバー解析で考慮するものであり、実測データに対して精度良くたわみを算定できることが示されている。構造解析に適用する収縮ひずみの算定式として、鉄道構造物等設計標準（以下、鉄道標準）¹⁾では、数値解析に基づき混合セメントや水掛かりの影響を考慮したひずみ算定式³⁾（以下、ひずみ算定式）が示されている。ひずみ算定式は、部材の実寸法や長期材齢への適用性を考慮して構築されたものであり、ファイバー解析モデルを用いたたわみ算定方法への適用の妥当性が確認されている³⁾。一方で、ひずみ算定式は2面乾燥条件を前提として構築されたものであり、部材面ごとの水掛かりの有無や、外気と箱桁内部での湿度差など、詳細な気象条件に応じたひずみの算定は困難であり、影響を評価した事例も少ない。

著者らは、これまで任意の断面・気象条件におけるコンクリート部材のひずみを予測することを目的として、コンクリート内部の水分状態に着目したひずみ解析プログラムの開発に取り組み、更新および検証を進めている⁴⁾⁵⁾。本稿では、ひずみ算定式と比較することで検証したひずみ解析プログラム（以下、開発プログラム）⁶⁾により、任意の気象条件におけるPC 箱桁断面の収縮ひずみを試算した。そして、試算したひずみをファイバー解析に入力することで、気象条件がPC 箱桁の長期たわみに及ぼす影響を検討した⁷⁾。

* 構造物技術研究部 コンクリート構造研究室

** 元 構造物技術研究部 コンクリート構造研究室

2. 収縮ひずみ解析モデル

2.1 解析モデルの概要

コンクリートの乾燥収縮解析として、微視的機構の水分移動・収縮メカニズムに着目した研究⁸⁾が進められている。著者らは任意条件下の部材断面の収縮ひずみを予測することを目的とし、拡散方程式に基づく水分移動モデルと、水分状態に応じた収縮駆動力・変形モデルを組み合わせたひずみ解析手法を提案した。本手法は、コンクリートの収縮ひずみのみを算定することに焦点を当てて計算過程を省略することで、JIS等の基準類に規定された指標で計算可能とする点に特徴がある。

開発プログラムでは、拡散方程式に基づく水分移動モデルによりコンクリート内部の相対湿度を算出し、これをもとに収縮駆動力である応力を求める。次に、セメント硬化体と骨材の連成を考慮したレオロジーモデルにより、断面内の収縮ひずみを算出する。各モデルの詳細について、2.2～2.3節で示す。

2.2 水分移動モデルおよび収縮駆動力

コンクリート中の水分状態を巨視的に捉える手法として、古くより拡散方程式に基づく解析事例⁹⁾が報告されている。開発プログラムでも拡散方程式に基づく水分移動モデルを適用し、断面内の相対湿度の変化は、式(1)で算定した。

$$\frac{\Delta RH}{\Delta t} = \begin{cases} D \frac{\partial^2 RH}{\partial x^2} & (\text{コンクリート内部}) \\ \eta \frac{RH'_{\text{air}} - RH}{\Delta x} & (\text{コンクリート表面}) \end{cases} \quad (1)$$

ここで、 RH ：相対湿度、 D ：水分伝導係数 ($\text{mm}^2/\text{日}$)、 η ：水分伝達係数 ($\text{mm}/\text{日}$)、 RH'_{air} ：見かけの外気相対湿度、 Δx ：要素間距離 (mm)、 Δt ：時間刻み (日)である。水分伝導係数は、既往研究⁹⁾を参考に、相対湿度に応じて式(2)で算出するものとした。

$$D = D_1 \left\{ \alpha_0 + \frac{1 - \alpha_0}{1 + \left(\frac{1 - RH}{1 - RH_e} \right)^n} \right\} \quad (2)$$

ここで、 D_1 、 α_0 、 RH_e 、 n は、拡散係数の非線形特性を決定するパラメータである。プログラムに実装している収縮駆動力の算定方法は、外気相対湿度に対する感度が過大であることが指摘されており、飽和度に応じた分離圧を考慮する式が提案されている¹⁰⁾。収縮駆動力の算定方法には改良の余地があるものの、外気相対湿度を変数とした感度解析より、ひずみ算定式と比較して概ね妥当な値が算定されることから、ここでは簡易に、外気相対湿度を見かけの値 ($RH'_{\text{air}} = 0.7 + (RH_{\text{air}} - 0.7)/2$) として分離圧の影響は考慮しないものとした。このときのコンクリート内部の飽和度の算定にあたっては、乾燥・湿潤過程における非可逆性を考慮するため、式(3)~(6)のモデルを導入した^{11) 12)}。

$$S_{\text{cap,gel}} = S_c + S_{\text{ads}} + S_{\text{ink}} \quad (3)$$

$$S_c = 1 - e^{-Br_c} \quad (4)$$

$$S_{ads} = t_m \int_{r_c}^{r_{0.99}} B e^{-Br} 2r^{-1} dr \quad (5)$$

$$S_{ink} = \begin{cases} 0 & \text{(湿潤過程)} \\ -S_c \ln(S_c) & \text{(乾燥過程)} \\ S_c \{\ln(S_{rmax}) - \ln(S_c)\} & \text{(湿潤過程から乾燥過程)} \\ -S_{rmin} \ln(S_c) & \text{(乾燥過程から湿潤過程)} \end{cases} \quad (6)$$

ここで、 S_{cap} および S_{gel} : 毛細管空隙およびゲル空隙の飽和度、 S_c : 半径 r_c 以下の空隙が液状水で満たされているときの飽和度、 S_{ads} : B.E.T 理論による吸着水に起因する飽和度、 S_{ink} : インクボトル効果によって閉じ込められた水分に起因する飽和度、 B : 空隙径に関するパラメータ、 t_m : 空隙半径 r_m (r_c と $r_{0.99}$ の幾何平均) に対応する吸着層厚さ、 r_c : 吸着層厚さで補正した気液界面の曲率半径、 $r_{0.99}$: 細孔径分布の 99% が存在する空隙半径、 S_{rmax} : 乾燥過程に転じる時点の飽和度、 S_{rmin} : 湿潤過程に転じる時点の飽和度である。

相対湿度と飽和度を関連付ける空隙径は、水和の進展に伴い緻密化すると考えられる。ここでは分布ピークとなる空隙径の逆数にあたるパラメータ B について、最大値を仮定したうえで、水和度に比例して B が増加、すなわち空隙径が減少するものとした。水和度については、式(7)~(8)に示す関数を採用した。

$$\Psi = \beta_0 \frac{t}{1.8(W/C)^{1.15} + t} \quad (7)$$

$$\beta_0 = 0.399 \ln(W/C) + 1.170 \quad (8)$$

ここで、 Ψ : 水和度、 W/C : 水セメント比、 β_0 : 水セメント比に応じた水和度の終局値、 t : 材齢 (日) である。水和反応の進展速度を表す式として、封かん状態での結合水量の経時変化より得られた双曲線関数¹³⁾を用いた。さらに、従来知られている水セメント比に応じた水和反応の停止を表現するため、実験結果より得られた近似式による値¹⁴⁾を双曲線関数に乗じた。なお、一般的な構造物の暴露条件では、封かん状態と比較して水和度が低下すると考えられる。ここでは、ひずみ算定式との比較も踏まえ、式(8)で算定した水和度を 90% まで低減して取り扱うものとした。

また、骨材の飽和度は、式(9)の既往研究で示されている普通骨材の水分等温線モデル¹⁵⁾を用いて算定するものとした。

$$S_{ag} = \begin{cases} \frac{2}{3} RH & (RH < 0.9) \\ 4.0RH - 3.0 & (0.9 \leq RH) \end{cases} \quad (9)$$

ここで、 S_{ag} : 骨材の飽和度である。

水分移動モデルで得られた相対湿度に基づき、凝縮水および吸着水に関わる収縮駆動力を式(10)~(12)で算出した⁸⁾。

$$\sigma_s = (\sigma_{sc} + \sigma_{sd})(1 - 2\nu) \quad (10)$$

$$\sigma_{sc} = \beta \left(-\frac{\rho_L \cdot R \cdot T}{M} \ln(RH) \right) \quad (11)$$

$$\sigma_{sd} = \frac{1 - k_2RH}{1 - k_2RH + k_1RH} S_{pore}^{gel} \quad (12)$$

ここで、 σ_s : 収縮駆動力、 σ_{sc} : 凝縮水の圧力降下に関する収縮力、 σ_{sd} : 吸着水に関する収縮力、 ν : ポアソン比 (=0.2)、 β : 毛細管張力が作用する体積の有効係数、 ρ_L : 液状水の密度、 R : 気体定数、 T : 絶対温度、 M : 水の分子量、 $k_1 \cdot k_2$: 定数 ($k_1=15, k_2=1$ と仮定)、 S_{pore}^{gel} : ゲル空隙の表面積である。朱ら⁸⁾は、毛細管空隙およびゲル空隙の平均飽和度が凝縮水の接触する固体表面率となることから、毛細管張力が作用する体積の有効係数としてこれを適用しているが、ここでは感度解析を踏まえ、毛細管空隙の飽和度を有効指標とした。収縮力は体積応力として等方に生じると考えられるため、ここでは式(10)で示すように見かけの軸方向の応力に換算することで、ポアソン比の影響を考慮した軸方向ひずみを算出した。

2.3 セメント硬化体と骨材の連成を考慮したレオロジーモデル

2.2 節で算定した収縮駆動力に応じて、収縮ひずみを算出する。弾性・塑性変形や遅れ変形を伴うコンクリートの変形特性を、ばねとダッシュポットを組み合わせたモデルで表現した⁸⁾。図 1 に、セメント硬化体のレオロジーモデルを示す。水和の進展に伴う弾性係数の増加は、レオロジーモデルを並列に追加することでモデル化した。

既往研究⁸⁾に基づき、平面保持の仮定で生じる外力による応力、レオロジーモデルに作用する応力、収縮駆動力の関係は、式(13)で表すものとした。また、このときのセメント硬化のひずみは、弾性変形と時間に依存するクリープ変形を総合的に表現するため、式(14)~(16)で表される毛細管空隙およびゲル空隙の弾性ひずみ、粘弾性ひずみ、粘塑性ひずみの和として表すものとした。

$$\sigma = \sum \sigma_{ly} + \sigma_s \quad (13)$$

$$\begin{cases} \sigma_{ly} = E_e \varepsilon_e \\ E_e = E_{cp} \end{cases} \quad (\text{弾性}) \quad (14)$$

$$\begin{cases} \sigma_{ly} = E_c \varepsilon_c + E_c C_c \frac{d\varepsilon_c}{dt} \\ E_c = \alpha_1 \cdot E_e \cdot f_{ec} \\ C_c = \alpha_2 \cdot \beta_S^c \cdot \beta_T \cdot \beta_r^c \end{cases} \quad (\text{粘弾性}) \quad (15)$$

$$\begin{cases} \frac{d\varepsilon_g}{dt} = \frac{1}{C_g} (\varepsilon_{glim} - \varepsilon_g) \\ \varepsilon_{glim} = \alpha_3 \cdot \varepsilon_e \cdot \chi_S \cdot \chi_T \cdot \chi_{non} \\ C_g = \alpha_4 \cdot \beta_S^g \cdot \beta_T \end{cases} \quad (\text{粘塑性}) \quad (16)$$

ここで、 σ : 外力によりセメント硬化体に生じる応力、 σ_{ly} : レオロジーモデルに作用する応力、 $\varepsilon_e, \varepsilon_c, \varepsilon_g$: ひずみ、 E_e, E_c : ばねの弾性係数、 C_c, C_g : ダッシュポットの粘性係数である。 $f_{ec}, \beta_S^c, \beta_S^g, \beta_T, \beta_r^c, \chi_S, \chi_T, \chi_{non}$ は飽和度や細孔径パラメータ等の影響を表す係数⁸⁾である。粘弾性ひずみ、粘塑性ひずみおよび発現速度に影響する係数 $\alpha_1 \sim \alpha_4$ は、ひずみ算定式で材齢 100 年としたひずみ算定値と概ね一致するよう決定した。また、 E_{cp} はセメント硬化体の弾性係数であり、既往研究¹³⁾を参考に式(17)より算定した。

$$E_{cp} = \left(0.036 + \frac{0.66}{W/C} \right) \Psi \times 10^4 \quad (17)$$

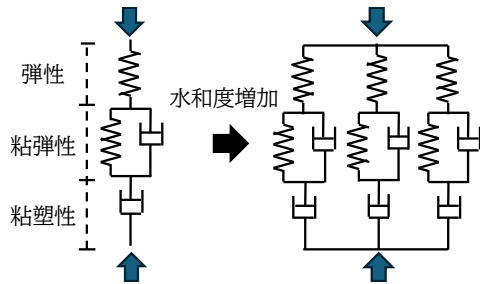


図1 セメント硬化体のレオロジーモデル

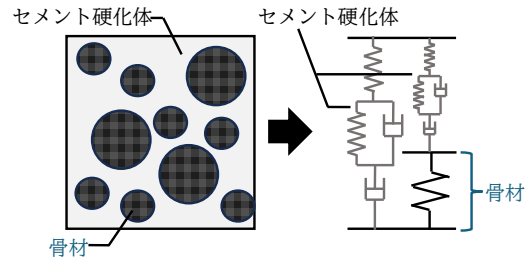


図2 セメント硬化体と骨材の複合モデル

また、乾燥過程においては、セメント硬化体と骨材は相互に作用しながらそれぞれ収縮すると考えられる。そこで、セメント硬化体と骨材との相互作用を、Mehmelら¹⁶⁾のモデルを簡易化した複合モデルにより表現した。図2に、セメント硬化体と骨材の連成を考慮した複合モデルを示す。また、図2の複合モデルにおける変形の適合条件を式(18)~(22)に示す。

$$\varepsilon_o = \varepsilon_{cp} = \sqrt[3]{V_{ag}} \varepsilon_{ag} + \left(1 - \sqrt[3]{V_{ag}}\right) \varepsilon_{cpag} \quad (18)$$

$$\sigma_o = \left(1 - \sqrt[3]{V_{ag}^2}\right) \sigma_{cp} + \sqrt[3]{V_{ag}^2} \sigma_{ag} \quad (19)$$

$$\sigma_{ag} = \sigma_{cpag} \quad (20)$$

$$\varepsilon_{ag} = \frac{\sigma_{ag}}{E_{ag}} + \varepsilon_{ag}^{sh} \quad (21)$$

$$\varepsilon_{cp,cpag} = f(\sigma_{cp,cpag}) \quad (22)$$

ここで、 ε_o ：コンクリートのひずみ、 ε_{cp} ：単相側のセメント硬化体のひずみ、 ε_{ag} ：骨材のひずみ、 ε_{cpag} ：複相側のセメント硬化体のひずみ、 σ_o ：コンクリートに作用する応力、 σ_{cp} ：単相側のセメント硬化体に作用する応力、 σ_{ag} ：骨材に作用する応力、 σ_{cpag} ：複相側のセメント硬化体に作用する応力、 V_{ag} ：骨材の体積率、 E_{ag} ：骨材の弾性係数、 ε_{ag}^{sh} ：骨材の収縮ひずみである。骨材の弾性係数は、既往研究¹³⁾を参考に式(23)より算定した。

$$E_{ag} = \frac{5.89}{\mu^{0.22}} \times 10^4 \quad (23)$$

ここで、 μ ：乾燥過程における骨材の吸水率(%)であり、初期値に骨材の飽和度を乗じて算定した。

また、骨材についても毛細管張力等を駆動力として収縮すると考えられるが、ここではコンクリートの収縮ひずみを解析対象とすることから、実験結果から良好な対応関係にあることが示されている式(24)より収縮ひずみを算定した¹⁵⁾。

$$\begin{cases} \varepsilon_{ag}^{sh} = \varepsilon_{ag}^{sh} \max(1.0 - S_{ag}/0.95) & (S_{ag} \leq 0.95) \\ \varepsilon_{ag}^{sh} = 0 & (0.95 < S_{ag}) \end{cases} \quad (24)$$

ここで、 $\varepsilon_{ag}^{sh} \max$ ：骨材の最終収縮ひずみである。複合モデルはセメント硬化と骨材の二相でモデル化する

ため、骨材の最終収縮ひずみは粗骨材と細骨材の平均として取り扱うこととなるが、ここでは、粗骨材および細骨材の収縮ひずみは同一とした。

2.4 解析モデルの検証

2.1～2.3 節で示した水分移動モデル、コンクリートの物性値や骨材との連成を考慮したひずみモデルについて、各種条件を変更して材齢 100 年でのひずみ解析を行い、影響因子に対する感度をひずみ算定式と比較することで検証した。部材厚は 400mm とし、2 面乾燥条件で解析を行った。図 3 に、材齢 100 年時点でのひずみに対して、ひずみ算定式において考慮されている各因子の影響を示す。横軸は、各因子に対して、算定値が線形となるように正規化したパラメータである³⁾。図中には、ひずみ算定式で得られるひずみの近似直線およびその±15%の範囲も併せて示した。また図 4 に、降雨条件下（28 日間のうち連続 4 日間降雨）と乾燥条件下のひずみの経時変化の比較を示す。

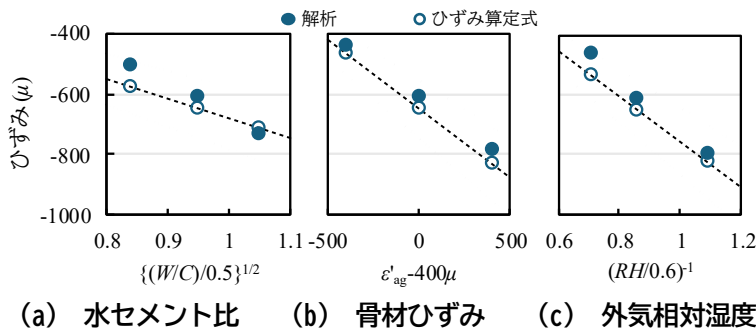


図 3 影響因子ごとの材齢 100 年のひずみ

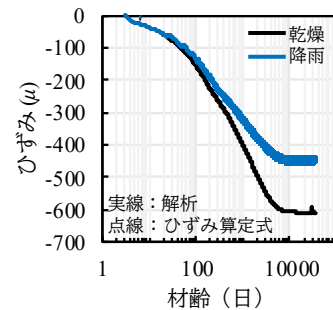


図 4 ひずみへの降雨の影響

図 3 より、各因子の影響について、ひずみ算定式と比較して概ね 15%以内の差でひずみを算定可能であることが示された。開発プログラムでは、粘弾性・粘塑性ひずみの大きさや発現速度のオーダーをパラメータで定め、水セメント比に応じた水和度の終局値や飽和度に応じた骨材の収縮ひずみ、見かけの外気相対湿度でこれらの影響因子の影響を簡易的に導入しているが、ひずみ算定式と近いひずみが得られたといえる。ひずみの経時変化に着目すると、図 4 より、降雨による収縮ひずみの減少は、ひずみ算定式では係数として常に一定比率で表現されるのに対し、解析では、材齢 100 日程度からひずみ差が生じる傾向が示された。一方で、材齢初期には乾燥時と降雨時でひずみ差が小さいことは既往研究¹⁶⁾でも示されており、妥当な傾向であると考えられる。

既往研究³⁾により、ひずみ算定式で得られたひずみをファイバー解析に入力することで、実構造物のたわみを算定可能であることが示されている。すなわち、開発プログラムにより算出した収縮ひずみをファイバー解析に入力して実構造物のたわみの算定に用いることの妥当性が確認されたものとして、任意の気象条件におけるたわみを試算した。

3. PC 箱桁の長期たわみ予測

3.1 対象構造物と気象条件

鉄道 PC ラーメン橋で多く採用されている 3 径間連続箱桁ラーメン橋梁¹⁷⁾を対象とし、ファイバー解析プログラムを用いて長期たわみを算定した。図 5 にファイバー解析モデルを示す。

橋脚は桁と剛結するとともに、下端に地盤ばねを設定した。コンクリート桁は断面を上層、中層、下層の

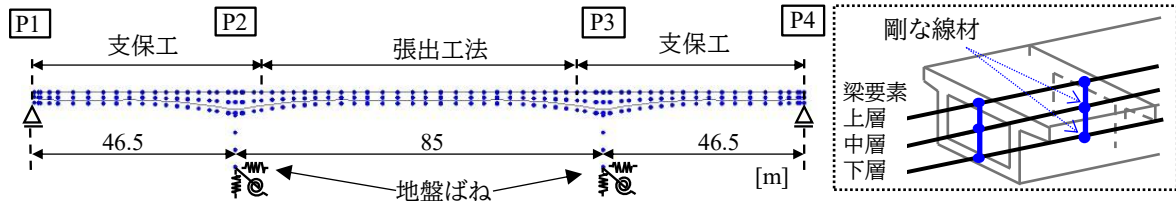


図5 ファイバー解析モデル¹⁷⁾

3要素に分割し、これを剛な線材で結合した。ここで、開発プログラムで得られた各層の平均収縮ひずみを、ファイバーモデルの各層の収縮ひずみとして入力することで、収縮差によるたわみを算定した。各層の平均収縮ひずみは、開発プログラムで得られる上床版、側壁、下床版それぞれに相当する要素のひずみを、要素寸法で重みをつけて平均化することで算出した。収縮ひずみの算定にあたっては、張り出し部の水掛かりや箱桁内が高湿度の環境を想定し、降雨の有無、雨掛かり面、箱桁内の相対湿度をパラメータとして比較検討を行った。表1に検討した気象条件ケースを示す。また図6に、case4の気象条件の概要と開発プログラムで得られた相対湿度分布を示す。

表1 気象条件ケース

	乾燥収縮				クリープ
	外気 RH (%)	水掛かり	水掛かり要素	箱桁内 RH (%)	RH (%)
case1	70	無し	-	70	70
case2		あり	上面		85
case3		※降雨日数	上面・	中層：70	
case4		4日/28日	張出部	下層：70	

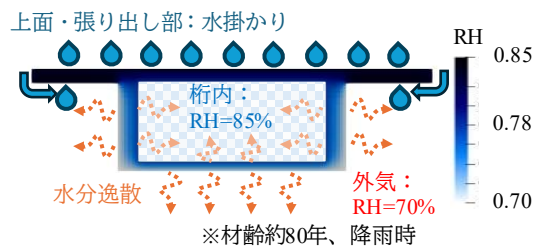


図6 気象条件および相対湿度分布 (case4)

降雨による水掛かりは、降雨中の水掛かり面要素の相対湿度を100%とすることでモデル化した。解析期間は80年とし、材齢3日から収縮が開始するものとした。コンクリートの配合条件として、 $W/C=40\%$ 、 $\epsilon'_{ag}=400 \times 10^{-6}$ とした。

外部作用として、ファイバー解析において死荷重(固定死荷重や付加死荷重および施工時荷重)とプレストレスによるクリープを考慮した。施工時荷重は、既往研究¹⁷⁾と同様に、張り出し工法の施工ステップや支保工製作後の自重を考慮した。クリープひずみの算出には、鉄道標準¹⁾に準じて式(25)で算定したクリープ係数を用いた。

$$\phi(t, t') = \frac{4W(1 - RH/100) + 350}{12 + f'_c(t')} \cdot \log_e(t - t' + 1) \cdot E_{ct} \quad (25)$$

ここで、 $\phi(t, t')$ ：材齢 t' 日に初載荷を行ったコンクリートの材齢 t 日におけるクリープ係数、 W ：コンクリートの単位水量 (kg/m^3)、 RH ：相対湿度 (%)、 t' 、 t ：載荷時および載荷中のコンクリートの有効材齢 (日)、 $f'_c(t')$ ：載荷時の有効材齢 t' におけるコンクリートの圧縮強度 (N/mm^2)、 E_{ct} ：載荷時の有効材齢 t におけるコンクリートのヤング係数 (N/mm^2) である。詳細な気象条件が外部作用によるクリープひずみに及ぼす影響については本検討の対象外とし、ここでの相対湿度は既往研究¹⁷⁾と同様に、乾燥条件 (case1) では全層で70%とし、水掛かり条件 (case2~4) では上層で95%、中層・下層で70%とした。

3.2 解析結果

図 7 に、開発プログラムによる材齢約 80 年 (case2~4 は降雨中) 時点での相対湿度コンター図を示す。また、図 8 に各層の平均ひずみの算定値を示す。

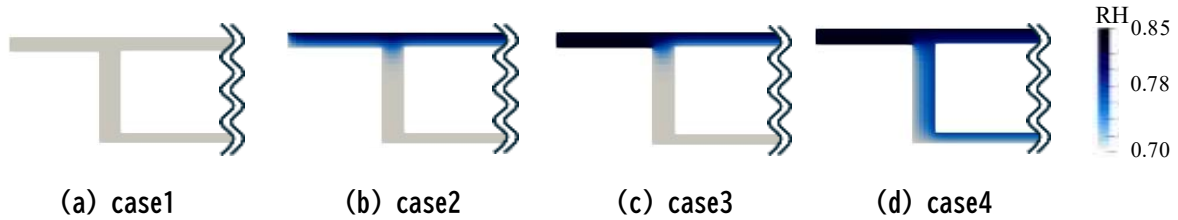


図 7 断面内相対湿度コンター図 (材齢約 80 年)

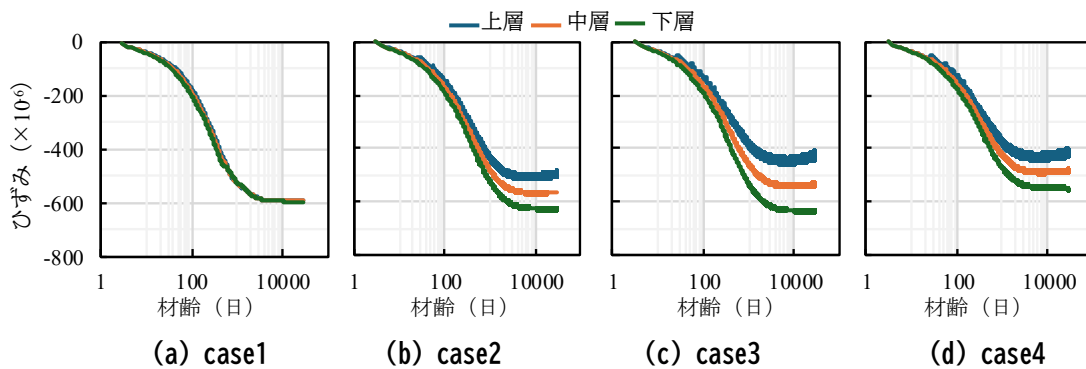


図 8 各層の平均ひずみの算定値

case1 (図 8(a)) では各層のひずみが同等であるのに対し、case2, 3, 4 (図 8(b), (c), (d)) では、水掛かりにより上層のひずみが小さくなり、断面内でひずみ差が生じた。このうち、張り出し部への水掛かりを想定した case3 (図 8(c)) では、case2 (図 8(b)) と比較して上層のひずみが小さく、各層間のひずみ差が大きくなり、張り出し部のひずみの抑制が、断面内のひずみ差を増加させる可能性が示唆された。一方で case4 (図 8(d)) では、case2 (図 8(b)) と比較して全層でひずみが減少したが、上層から下層までのひずみ差は同程度であった。桁内の外気相対湿度は上・中・下層全てに影響するため、各層のひずみが同様に減少したことにより、case4 ではひずみ差が case2 と同等でありながら、断面全体でひずみが減少したと推察される。case3 および case4 は、いずれも水掛かりや桁内の湿度を高め設定したことによるひずみの減少を仮定したケースであるが、断面内のひずみ差への影響は、環境条件が作用する部材面に依りて大きく異なることが示唆された。

開発プログラムで算定したひずみと、比較としてひずみ算定式のひずみを用いて、ファイバー解析で鉛直方向のたわみを算定した。図 9 に、収縮による支間中央のたわみの経時変化を示す。図 10 に、版上載荷後約 80 年における橋軸方向のたわみ分布を示す。

図 9(a)より、case1 の収縮によるたわみの経時変化は、乾燥条件のひずみ算定式のひずみを適用した場合と同様の挙動を示し、施工開始から約 80 年時点のたわみを 10%程度の差で算定できることが示された。一方で乾燥条件に対する降雨条件でのたわみの変化については、開発プログラムでは case1 に対して case2 のたわみが大きく算定されたのに対し、ひずみ算定式を用いた試算では、たわみがわずかに減少した。降水がたわみの増減に及ぼす影響は支間割によっても異なることが明らかとなっており¹⁷⁾、死荷重やプレストレス、クリープを受け、複雑に変化するものと考えられる。水掛かりの有無によるたわみの大小関係は、あ

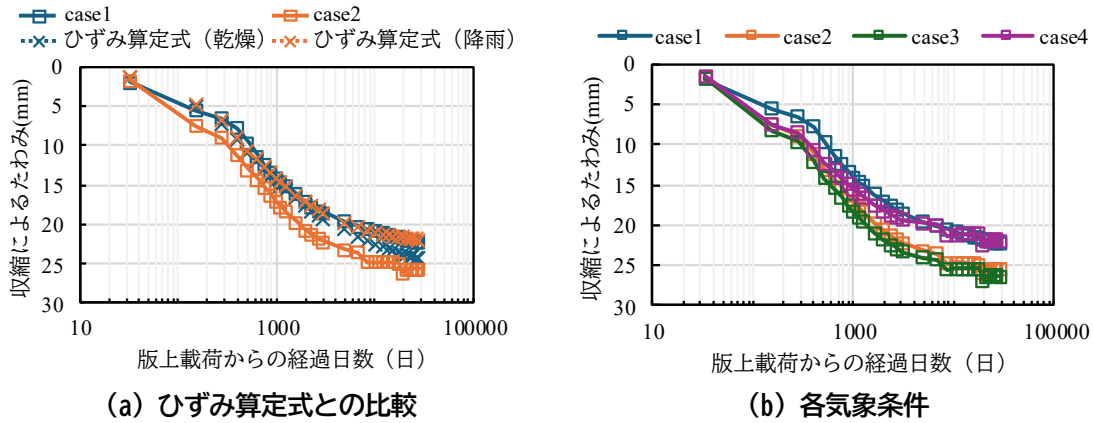


図9 収縮による支間中央のたわみの経時変化

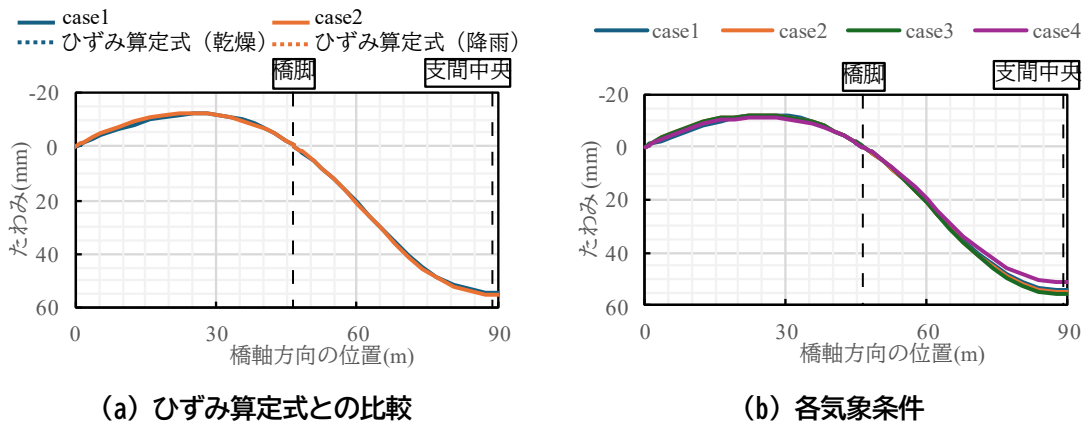


図10 橋軸方向の全たわみの分布

くまで本検討の条件下での結果であり、さらなる検証が求められる一方で、約 80 年後の全たわみ(図 10(a))はひずみ算定式のひずみを用いた場合と同等に算定されたといえる。

図 9(b)の case3 および case4 のたわみの経時変化に着目すると、case2 と同様に、版上載荷後初期からたわみが増加する傾向が示された。一方で、最終的なたわみは case3 では case2 と同程度であるのに対し、case4 では 1000 日程度からたわみの増加が緩やかとなり、80 年時点では乾燥条件と同程度の値を示した。これは、先述のとおり、case4 では全体的な収縮ひずみや断面内ひずみ差が小さくなるためと考えられる。加えて、降水条件では乾燥条件と比較してクリープ係数が小さいため、図 10(b)で示されるように、全たわみは case4 で最小となった。

水分状態に応じたひずみ解析により、気象条件に応じて構造物の長期変形量を試算できることが示された。したがって、供用環境の気象条件を詳細に計測・把握することで、本手法における長期変形の確度の向上が期待され、長大橋りょうなど収縮の影響が大きい構造物の長期変形量に対しても、構造形式・支間割等に応じた適切な予測に有用であると考えられる。

4. まとめ

コンクリート内部の水分状態の変化に着目したひずみ解析プログラムを用いて、気象条件を仮定して PC 箱桁断面の収縮ひずみを試算し、ファイバー解析を行うことで、気象条件の差異が長期たわみに及ぼす影響について検討した。

- (1) 上床版上面への水掛かりを設定した場合は、上層のひずみが減少するため断面内にひずみ差が生じた。張り出し部下面への水掛かりを想定したケースではさらに断面内のひずみ差が増加したが、箱桁内の相対湿度を高く設定したケースでは、ひずみの絶対値、および断面内のひずみ差が減少した。
- (2) 乾燥条件および箱桁内高湿度のケースでは、いずれも収縮に起因するたわみは小さいが、水掛かり条件ではクリープ係数が小さくなるため、最終的な全たわみは箱桁内高湿度のケースで最小となった。
- (3) コンクリートの配合や構造形式の他、供用環境の気象条件の詳細な計測・把握により、気象条件に応じた構造物の長期変形量が試算されることで、構造形式・支間割等に応じた適切な長期変形予測が期待される。

文 献

- 1) 国土交通省鉄道局監修，鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説（コンクリート構造物），丸善出版，2023
- 2) 渡邊忠朋，土屋智史，坂口淳一，笠井尚樹：断面の部位別に時間依存挙動を考慮した線材モデルによる PC 橋梁の長期たわみ解析，土木学会論文集 E2，Vol.69，No.2，pp.207-226，2013
- 3) 渡辺健，中村麻美，石田哲也，渡邊忠朋：混合セメントおよび水掛かりを考慮したコンクリートの収縮ひずみ予測式の提案，土木学会論文集 E2，Vol.78，No.1，pp.105-120，2022
- 4) 大野又稔，渡辺健：要素試験体の水分・収縮評価に基づく供用環境下 PC 桁の変形予測，コンクリート工学年次論文集，Vol.39，No.1，pp.361-366，2017
- 5) 中村麻美，渡辺健，大野又稔，安保知紀：吸水現象の時間依存性を考慮した水分移動モデルとコンクリートの変形予測手法，コンクリート工学年次論文集，Vol.40，No.1，pp.435-440，2018
- 6) 橋本龍，渡辺健：水分状態と骨材・鉄筋による内部拘束を考慮した RC 断面の収縮解析，コンクリート工学年次論文集，Vol.47，No.1，pp.1794-1799，2025
- 7) 橋本龍，田中伸明，渡辺健：水分移動・ひずみ解析に基づく PC 橋梁の気象条件と長期変形に関する一考察，プレストレストコンクリート工学会第 34 回シンポジウム論文集，pp.387-392，2025
- 8) 朱銀邦，石田哲也，前川宏一：細孔内水分の熱力学的状態量に基づくコンクリートの複合構成モデル，土木学会論文集，No.760/V-63，pp.241-250，2004
- 9) Z. P. Bazant, L. J. Najjar, "Nonlinear water diffusion in nonsaturated concrete", Materials and Structures, Vol.5, No.25, pp. 3-20, 1972.
- 10) Yao Luan, Tetsuya Ishida, "Enhanced Shrinkage Model Based on Early Age Hydration and Moisture Status in Pore Structure," Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.11, pp.360-373, 2013.
- 11) 朱銀邦：細孔内水分の熱力学的状態量に基づくコンクリートの複合構成モデル，東京大学大学院博士論文，2003
- 12) Koichi Maekawa, Tetsuya Ishida, Toshiharu Kishi, "MULTI-SCALE MODELING OF STRUCTURAL CONCRETE", Taylor & Francis, 2009.
- 13) 清原千鶴，永松静也，佐藤嘉昭，三橋博三：複合則理論を用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみの予測式—終局乾燥収縮ひずみの評価方法—，日本建築学会構造系論文集，Vol.70，No.590，pp.9-16，2005
- 14) 内海秀幸：古典的アプローチに基づくコンクリートの水分組成表現，コンクリート工学，Vol.57，No.4，pp.256-260，2019
- 15) 浅本晋吾，石田哲也，前川宏一：骨材特性との連関を考慮した複合構成モデルによるコンクリートの収縮解析，土木学会論文集 E，Vol.63，No.2，pp.327-340，2007
- 16) 趙力采，小林一輔：コンクリートの弾性係数における複合特性，コンクリートジャーナル，Vol.12，No.7，pp.27-34，1974
- 17) 荒木一徳，渡辺健，石田哲也：プレストレストコンクリートラーメン橋りょうの長期変形に関する解析的検討，構造工学論文集，Vol.68A，pp.693-701，2022

大型土のうの本設利用による被災盛土の早期復旧法

佐藤 武斗* 松丸 貴樹* 伊藤 亘記**

Rapid Restoration Method Using Permanent Large Sandbag for Rainfall Induced Embankment Failures

Taketo SATO Takaki MATSUMARU Kazuki ITO

Conventional restoration method for rainfall-induced railway embankments failures using large sandbags involves considerable construction costs and prolonged construction duration. This study proposes a permanent structure employing large sandbags and evaluates its seismic performance and cumulative settlement behavior under train loads. Based on these evaluations, an optimized restoration method is proposed. The proposed method was found to reduce construction costs and duration by approximately 80% and 60%, respectively, compared with the conventional approach.

キーワード：災害復旧，盛土，大型土のう，振動台実験，繰返し載荷試験

1. はじめに

鉄道盛土が降雨により被災した際には、図 1 に示す早期の列車運行の再開を目的とした大型土のうを用いた応急復旧が行われる場合がある。これまで大型土のうを残置した盛土構造の性能は十分に検証されておらず、慣例的に本設構造に利用されていない。そのため、本復旧時には列車運行を継続した状態で、大型土のうの撤去、盛土の構築が必要となり、列車防護のために施工する仮土留めが工期の長期化や工事費の増大の要因となる課題があった。

このような課題に対して、坂本ら¹⁾は前面から大型土のうを貫通して地山補強材を打設することで、耐震性の向上や土のうの長期的な沈下の抑制を図る構造を提案した。森ら²⁾は大型土のうの積上げ時に面状補強材を敷設し、前面に腹付け盛土を構築する復旧法を提案した。これらの復旧法は地山補強材や面状補強材の施工に伴い復旧盛土の性能向上を見込んだ強化復旧とみなすことができる。その一方で、原状復旧を目的とした場合には施工コストを要することが懸念される。

そこで、本研究では本復旧も含めて早期に復旧可能な原状復旧に活用することを目的とした、大型土のうを本設利用する復旧法を提案した。本報告では、提案復旧法を概説するとともに、提案復旧法の動的特性の評価のために実施した振動台実験および繰返し載荷試験、従来復旧法と提案復旧法の工事費と工期の比較について報告する。

2. 提案復旧法の概要

提案復旧法の概要を図 2 に示す。新設盛土の設計では要求性能に応じて一定の耐震性を考慮しており、被災盛土の復旧においてもこれに準じる必要がある。提案復旧法では、原状復旧相当の性能を見込んでおり、L2 地震動（構造物の建設地点で考えられる最大級の地震動）を対象とする場合には別途耐震補強を検討する必要がある。従来復旧法と同様に、提案復旧法は大型土のうにより被災箇所を修復した後に、暫定

* 構造物技術研究部 土構造研究室

** 軌道技術研究部 軌道・路盤研究室

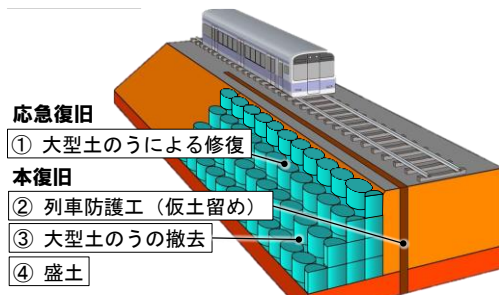


図1 従来復旧法の概要

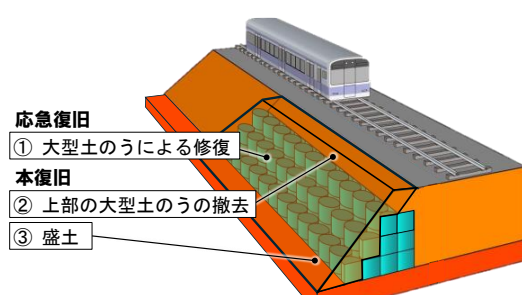
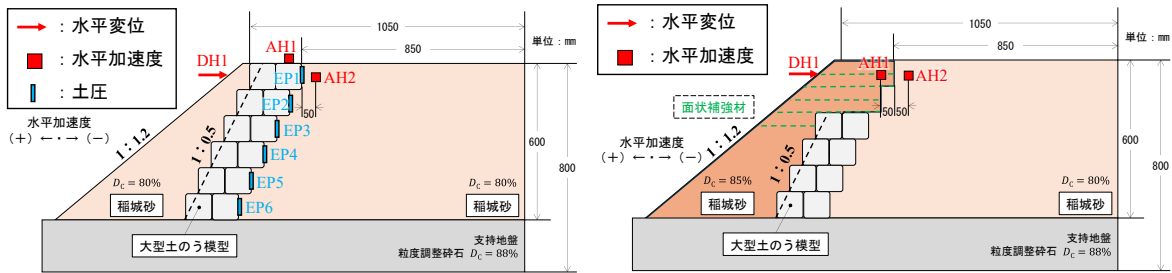


図2 提案復旧法の概要



(a) Case 1

(b) Case 2

図3 実験模型の概要

的な列車の運行再開が可能となる。その後、必要に応じて上部の大型土のうを撤去し、前面に腹付け盛土を構築する復旧法である。上部の大型土のうの撤去は、後述する振動台実験結果を踏まえて、耐震性の向上を図るために設定した仕様であり、前面に構築する腹付け盛土は提案構造の安定性や大型土のうの耐候性の向上を意図している。なお、低盛土の場合には、必ずしも大型土のうの撤去が必要とならない場合も考えられる。以降では、提案復旧法を対象に性能確認試験として実施した(1) 振動台実験による耐震性、(2) 繰返し载荷試験による列車荷重に対する累積沈下特性について概説する。

3. 提案復旧法の耐震性の評価

3.1 振動台実験による耐震性の評価

3.1.1 振動台実験の概要

提案復旧法の耐震性を評価するために、1/10 スケールの盛土模型を用いて鉄道総研所有の中型振動台試験装置を用いて振動台実験³⁾⁴⁾を実施した。

実験模型の概要を図3に示す。一定の高さを有する盛土に対して大型土のうを本設利用する構造として、Case 1 では提案復旧法の比較対象として土のう模型の前面に腹付け盛土を構築する構造を、Case 2 では上部の土のう模型を撤去して腹付け盛土を構築する提案復旧法を想定した2ケースについて振動台実験を実施した。なお、本実験では高加速度の振動台実験の実施により提案復旧法の崩壊形態を評価したが、提案復旧法では原状復旧相当の性能を見込んでいる点に留意されたい。そのため、Case 2 では高加速度の加振条件により確認された腹付け盛土の表層すべりの発生防止を目的に、腹付け盛土の上半分面に面状補強材模型を敷設した。これは、後述するCase 1の振動台実験結果より腹付け盛土に表層すべりが見られたことを踏まえて、高加速度の加振に伴う表層すべりの発生を抑制するが、土のう模型の揺動に伴うのり肩の崩壊の発生を阻害しない実験上の措置として実施した。

各ケースに共通して、現行の設計標準⁵⁾で粒度配合の悪い土質3に分類される稲城砂を締固め度 $D_c=80\%$

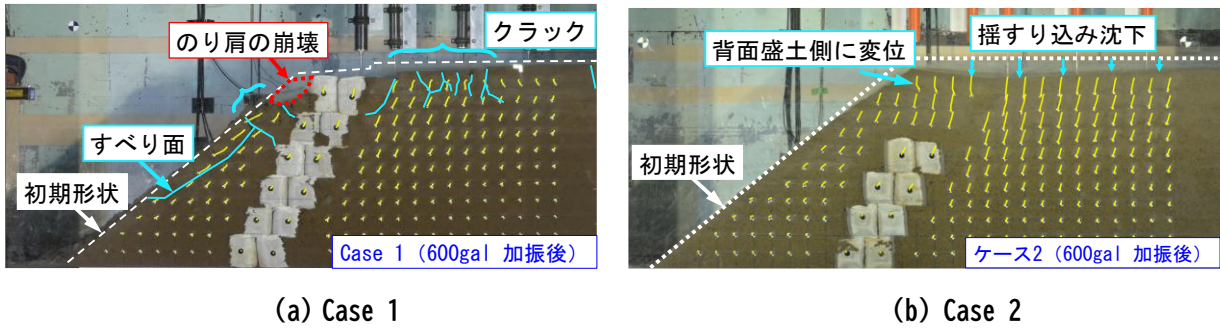


図4 600 gal 加振後の実験模型の外観

である乾燥密度 1.393 g/cm^3 を目標に締固めて構築した。稻城砂の詳細は、既報³⁾⁴⁾を参照されたい。土のう模型は、実物と同じポリエステル製の土木シートを用いて縫製し、中詰め材には盛土材料と同じ稻城砂を締固め度 $D_c=75\%$ を目標に緩い密度で充填することで構築した。Case 1 の腹付け盛土は既設盛土と同様の密度であるが、Case 2 では現行の施工管理基準⁵⁾が適用されて構築された状況を想定して、Case 1 よりも密である締固め度 $D_c=85\%$ で構築した。Case 2 に用いた面状補強材模型は、香川⁶⁾の相似則を勘案して実物の面状補強材の気中引張剛性と整合するポリエチレン製のネットを高さ 50mm 間隔で敷設した。振動台実験は、水平方向に 5 Hz の正弦波を用いて、最大加速度を約 100 gal ずつ増大させる段階加振を実施した。

3.1.2 振動台実験結果

各ケースの 600 gal 加振後の実験模型の外観を図 4 に示す。(a) Case 1 は 400 gal 加振よりのり肩に変位が生じ、600gal 加振では損傷が見られた。また、背面盛土の天端には深さ 50~100 mm 程度のクラックが発生した。(b) Case 2 はのり肩や盛土天端に崩壊は見られず、背面盛土の揺すり込み沈下に伴い、腹付け盛土が背面盛土側に変位する挙動が見られた。この際に、視認できるクラック等の変状は見られなかった。

各ケースののり肩 (DH1) における水平変位振幅-加振加速度関係を図 5 に示す。各ケースの耐震性を比較するにあたり、Case 1 では計測点に変位が生じ、Case 2 では背面盛土の揺すり込み沈下に追従した変位が生じ、残留変位での比較が困難であった。そこで、既往の研究⁷⁾を参考に加振時ののり肩の水平変位振幅に着目した。400 gal 加振までの Case 1 の水平変位振幅は Case 2 よりもわずかに大きい傾向が見られたが、400gal 以降の加振では計測点の変位が大きく計測不能となった。一方、Case 2 では 700gal 加振に対しても大規模な崩壊が生じず、上部土のうの撤去による耐震性の向上が確認された。

各ケースの盛土上部における応答加速度の時刻歴を図 6 に示す。Case 1 ではのり肩に変位が生じ始めた 400gal 加振時に、Case 2 では前述した 600 gal 加振時に着目した。(a) Case 1・400gal 加振時では土のう模型の応答加速度 AH1 に顕著な応答増幅が見られ、前面に慣性力が作用する負の最大応答加速度の絶対値は 1592 gal であった。このような挙動は、腹付け盛土の上部では腹付け盛土幅が小さく、受働土圧に期待できないことから、加振時に上部の土のうの水平方向の拘束圧力が小さいことに起因する。(b) Case 2・600 gal 加振時では、盛土上部の AH1 と AH2 の応答加速度に大きな相違は見られず、一体となって応答していることが確認された。また、AH1 における負の最大応答加速度の絶対値は 1040 gal であり、Case 1 よりも応答増幅が小さいことが確認された。以上より、水平方向の拘束圧が小さい盛土上部に大型土のうを配置しない構造とすることで、耐震性の向上が見られた。

3.2 振動台実験の再現解析

3.2.1 再現解析の概要

Case 1 における振動台実験結果では最上段の土のう模型前面の腹付け盛土が崩壊に至ったことから、土

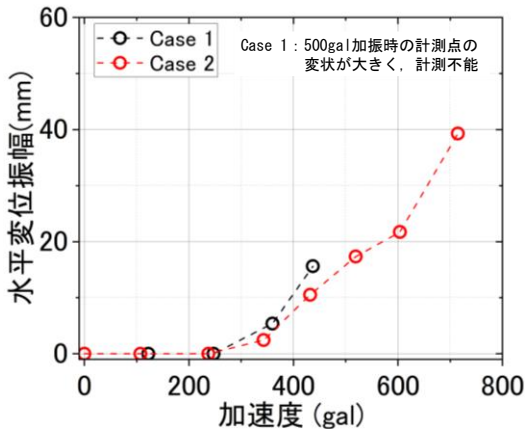
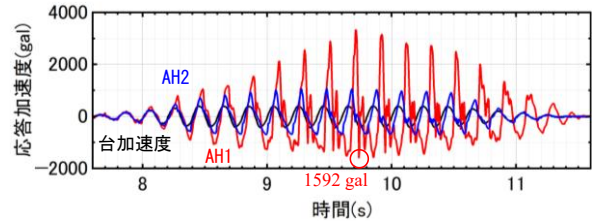
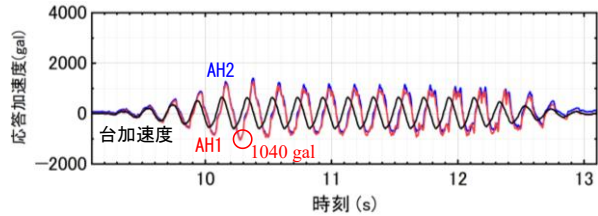


図5 各ケースののり肩 (DH1) における水平変位振幅－振動台加速度関係



(a) Case 1・400 gal 加振時



(b) Case 2・600 gal 加振時

図6 各ケースの盛土上部 (AH1・AH2) における応答加速度の時刻歴

この模型や腹付け盛土が一体となって挙動するのではなく、土のう模型の各段で挙動することが示唆された。その一方で、Case 2では上部の土のうを撤去することで、腹付け盛土および背面盛土が概ね一体となって挙動したことから、土のうの覆土厚や土のうの高さに応じてこれらの挙動が変化すると考えられる。

上記を踏まえて、検討した提案復旧法の安定解析の概要を図7に示す。安定解析では土のうの各段における滑動破壊に関する照査を実施することとした。本図は、振動台実験におけるCase 2提案復旧法の上から3段目の土のう模型および腹付け盛土を対象とした力の釣合いの模式図であるが、本検討では安定解析手法の妥当性を検証するために、このような崩壊が見られなかったCase 2も同様の手法により検討した。各段の安定に対して、作用力として腹付け盛土および土のうに作用する慣性力や、盛土からの地震時主働土圧を、抵抗力として腹付け盛土および土のうの摩擦力を考慮した。地震時土圧は土圧算定用の仮想背面に対して、土留め標準³⁾に準拠して修正物部・岡部式により算定した。過去に実施した使用材料の摩擦試験結果を踏まえて、大型土のうの摩擦係数は土のう模型同士を $\mu=0.3$ 、土のう模型と盛土間を $\mu=0.5$ 、土のう模型と支持地盤間を $\mu=0.7$ と設定した。安定解析に使用した盛土材料の強度定数は、内部摩擦角 $\phi=32.7^\circ$ とし、粘着力 $c=0.0$ kPaとした。安定照査式を式(1)に示す。

$$I = \frac{F_1 + F_2 + F_3}{F_4 + F_5 + F_6} \tag{1}$$

ここに、 I ：照査値、 F_1 ：腹付け盛土に作用する慣性力、 F_2 ：土のうに作用する慣性力、 F_3 ：土のうに作用する地震時土圧、 F_4 ：腹付け盛土のせん断抵抗力、 F_5 ：腹付け盛土と土のう間の摩擦抵抗力、 F_6 ：土のう間の摩擦抵抗力である。

3.2.2 再現解析結果

安定解析による照査値－水平震度関係を図8に示す。安定解析は各段に対して実施したが、Case 1では最上段が、Case 2では上から3段目の土のう模型および腹付け盛土の照査値が最も大きい結果であったため、図中にはこれらの結果を示した。このように上段の土のう模型ほど照査値が大きい原因は、上段の土のう模型ほど、前面に構築された腹付け盛土の幅に起因した滑動抵抗力が小さくなるためである。図5に示す振動台実験結果を参照すると、Case 1は400 gal加振時にのり肩に変状が生じ、Case 2は700 gal加振時

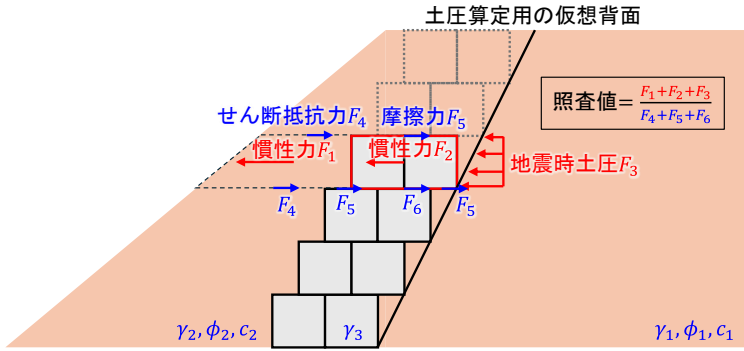


図7 提案復旧法の安定解析の概要

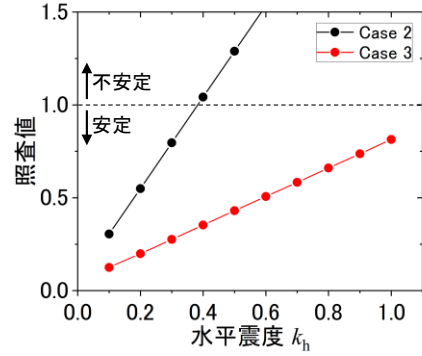


図8 照査値－水平震度関係

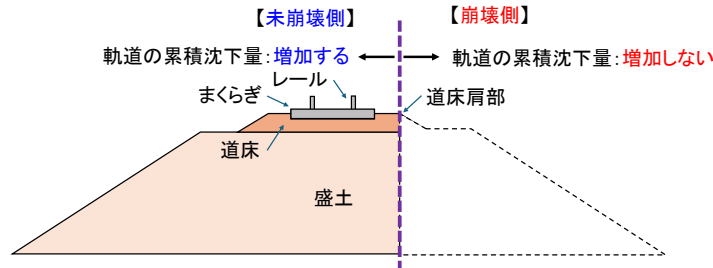


図9 軌道の累積沈下量が増大する盛土の崩壊範囲

においても腹付け盛土や土のう模型は崩壊に至らなかった。安定解析結果において、Case 1 では水平震度 $k_h=0.4$ 時に概ね照査値 1.0 を超過し、Case 2 では水平震度 $k_h=0.7$ であっても照査値は 1.0 未満で安定を満足する結果が得られた。よって、安定解析結果は振動台実験結果と概ね整合することが確認された。

4. 提案復旧法の累積沈下特性の評価

被災した盛土における列車の繰返し通過で生じる軌道の累積沈下については、これまでに 1/5 スケールの盛土模型上に設置した 1/5 スケールのバラスト軌道模型に対する繰返し载荷試験が行われてきた⁹⁾。試験の結果より、盛土の崩壊範囲が道床肩部よりも軌道中心側（列車荷重の影響範囲）に至らなければ軌道の累積沈下の増加は生じないこと、まくらぎ端部まで盛土が崩壊した場合であっても大型土のうによる応急復旧により盛土の崩壊領域が道床肩部まで達しない場合と同程度まで軌道の累積沈下量を抑制できることがわかっている（図9）。

そこで、本章では、提案復旧法における列車荷重によるバラスト軌道の累積沈下特性を評価するため、大型土のうの撤去を行わない低盛土を対象とした実物大模型を用いた繰返し载荷試験¹⁰⁾を実施した。3章で示した提案復旧法（図7）では大型土のうを2列、かつ盛土天端に近い大型土のうを2段撤去した後に盛土材料で大型土のうを覆土している。文献9)の知見を踏まえて、本検討では軌道の累積沈下量が増加するまくらぎ端部まで崩壊した条件を想定し、安全側に評価するため大型土のうの設置を1列とした。また、覆土した大型土のうの設置位置が列車荷重の影響範囲内にある場合の軌道の累積沈下量の影響を評価するために、提案復旧法における盛土天端に近い大型土のうを撤去せずに盛土材料で大型土のうを覆土した。

さらに、繰返し载荷試験で評価した大型土のうによる変形抑制効果を踏まえて、累積損傷度理論を用いた沈下解析¹¹⁾（以下、沈下解析）により、提案復旧法を適用した盛土において、列車の繰返し通過によって生じる盛土の累積沈下量を推定した。

4.1 繰返し載荷試験による累積沈下特性の評価

4.1.1 実物大模型の検討

1978年の「建造物設計標準（土構造物編）」の発行以前に建設された路盤・路床では、設計標準⁵⁾に示されるような力学的な検討および実績に基づいた設計・施工が行われていない場合が多く、路盤を設けずに原地盤や盛土上に直接バラスト軌道が敷設されている事例が多い。そこで、本検討では、1978年以前の建設であることを想定して、路盤を設けずに盛土上に直接バラスト軌道を敷設した条件の模型（以下、実物大模型）を構築した。

実物大模型は試験土槽（幅3.5m、長さ7.0m、高さ2.5m）内に構築する制約があり、かつ試験土槽の深さにも制約があったため、盛土高さを大型土のう1つ分の高さに合わせた1.0mとすることとした。実物大模型では盛土崩壊に伴う軌道沈下特性の変化を評価することを目的としており、盛土の剛性に起因する軌道沈下を生じさせないように配慮した。具体的には、設計標準に示されているバラスト軌道を新設する際の路床に必要な地盤反力係数 K_{30} 値 = 70 MN/m³ 以上を参考に、実物大模型の盛土の K_{30} 値を 70 MN/m³ に設定した。また、列車通過時の動的な路盤変位が 1 mm 程度以上となると、バラスト軌道の変形による軌道変位進みが増加する傾向¹²⁾を示すことが知られている。本検討では、盛土材料よりも剛性が低く、かつ塑性変形が生じにくい EPS（単位体積重量 0.2 kN/m³）を支持地盤上に設置することで、載荷時の盛土天端における鉛直変位が 1 mm となるように FEM 解析に基づいて EPS の層厚を選定した。

実物大模型の解析モデルおよび物性値を図 10 に示す。EPS の弾性係数は、文献 13 を参考に設定した。また、実物大模型に対する繰返し載荷試験では、まくらぎ 3 本に対して、軸重 160kN の 1 軸分の荷重を与える条件としたことから、解析モデルでは模型中央のレール上に各 80 kN（計 160 kN）を載荷した。FEM 解析の結果、EPS の層厚を 150 mm とすることで、盛土天端の鉛直変位が概ね 1 mm となることを確認した（図 11）。

4.1.2 応急復旧および提案復旧法に対する繰返し載荷試験の概要

実物大模型の盛土材料には稲城砂を用い、締固め度 90%（乾燥密度 1.572 g/cm³）を目標として、盛土天端の地盤反力係数 K_{30} 値が 70 MN/m³ 程度となるように盛土を構築した。この K_{30} 値 = 70 MN/m³ は、バラスト軌道を新設する際、路床に求められる剛性である⁵⁾。

繰返し載荷試験のケースを表 1 に示す。各ケースについては、case 1 で未被災、case 2 で大型土のうを用いた応急復旧、case 3 で大型土のうを盛土材料で覆土した提案復旧法、case 4 でまくらぎ端部までの崩壊を

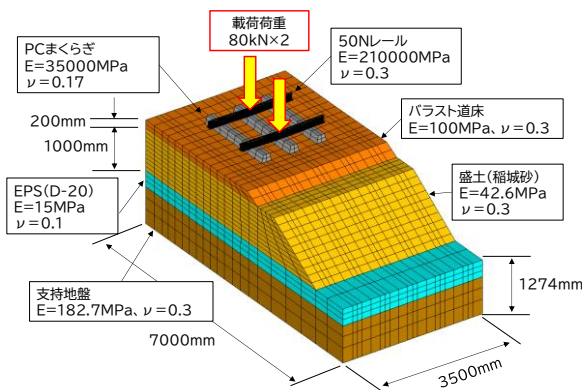


図 10 実物大模型の解析モデル

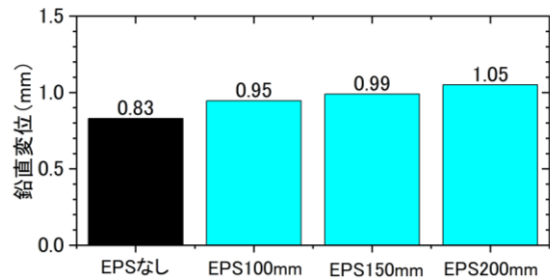


図 11 EPS の層厚と鉛直変位の関係

表 1 繰返し載荷試験に用いた実物大模型の条件

試験ケース	盛土の崩壊および復旧工の条件
case1	未被災
case2	まくらぎ端部まで崩壊した盛土に対する大型土のうを用いた応急復旧
case3	case2で設置した大型土のうを盛土材料で覆土した提案復旧法
case4	まくらぎ端部まで崩壊（復旧工を全て取除いた条件）

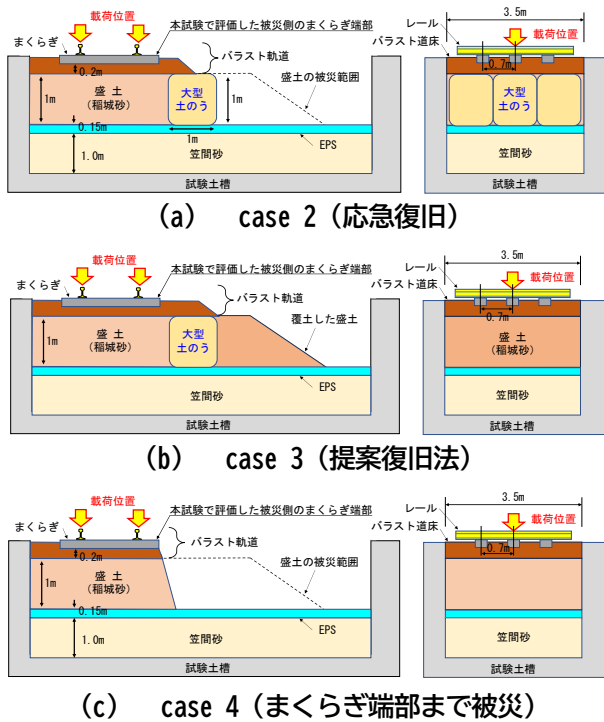


図12 実物大模型の概要 (case 2, case 3, case 4)

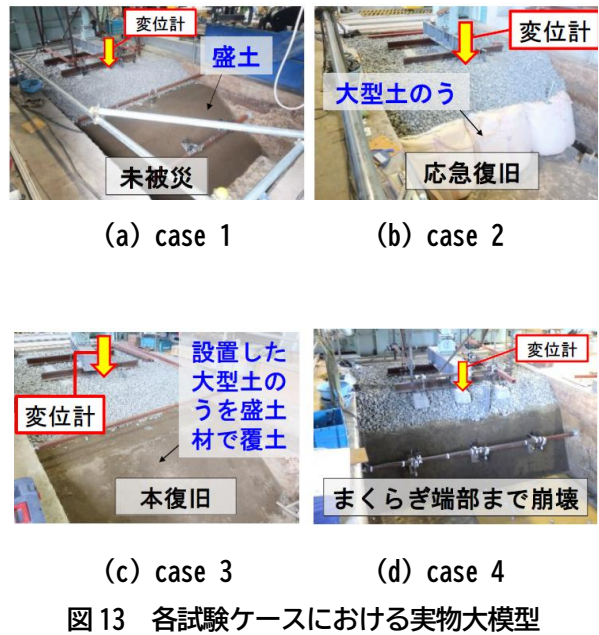


図13 各試験ケースにおける実物大模型

想定した。本試験では、case 1 の試験後に、case 2, case 3, case 4 の順序で同じ実物大模型を用いて載荷を行っており、前の試験ケースの載荷履歴を引き継いだ形で検討を行った。case 1 の載荷試験の結果を基準として、case 2 および case 3 の結果を比較することで、応急復旧および提案復旧法による軌道沈下の抑制効果を評価した。なお、予備載荷として case 1 の試験前に 50 万回の載荷を行った。試験に用いた実物大模型の概要を図 12 に示す。実物大模型の路床上に敷設する EPS の層厚は、前項を基に 150 mm とした。

case 2 ではまくらぎ端部まで盛土を掘削し、大型土のうを軌道長手方向に 3 体並べて設置した。大型土のうは、ポリプロピレン製の大型土のう袋を用いており、その中詰め材に稲城砂を用いて盛土と同じ締固め度 90% (乾燥密度 1.572 g/cm³) となるように締固めて作製した。なお、3 章の 1/10 スケールの振動台実験に用いた土のう模型では締固め度 75% で作製したが、繰返し載荷試験に用いた大型土のう模型は実スケールであり、大型土のう袋内で稲城砂を比較的容易に締固めることが可能なため、実現場を想定して盛土と同じ締固め度 90% で作製した。case 3 では case 2 の試験後に設置した大型土のうを撤去せずに、未被災時の盛土形状となるように腹付け盛土した。case 4 では case 2 および case 3 で施工した土のうや腹付け盛土を全て取り除いた。載荷位置は中央のまくらぎのレール上とし、繰返し荷重は最小 5 kN, 最大 165 kN (荷重振幅 160 kN) とした。載荷周波数は 5 Hz とし、各試験ケースの載荷回数は 50 万回とした。

図 13 に各試験ケースにおける実物大模型を示す。計測はまくらぎ両端部、盛土天端および盛土のり面部に変位計を設置したが、試験結果は崩壊側における中央のまくらぎ端部のみを示す。

4.1.3 繰返し載荷試験結果

崩壊側におけるまくらぎ変位 (載荷時) およびまくらぎ変位振幅を図 14 に示す。ここで、各ケースのまくらぎ変位は各載荷前を 0 mm とした。崩壊側の載荷 50 万回時のまくらぎ変位は、case 4 (まくらぎ端部まで崩壊)、case 1 (未被災)、case 2 (応急復旧)、case 3 (提案復旧法) の順で小さくなった。前の試験ケースの載荷履歴の影響を受けたことでバラスト道床が締め固まったため、試験ケースの順で case 1~case 3 まで、まくらぎ変位は小さくなったが、case 4 の条件でまくらぎ沈下が case 1 よりも大きく生じたことから、応急復旧・提案復旧法が軌道沈下を抑制する効果を有していると考えられる。

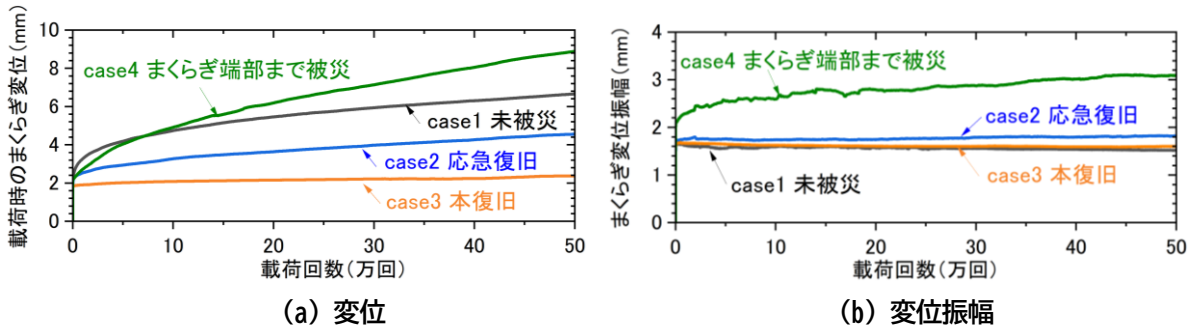


図 14 まくらぎ変位の結果（崩壊側）

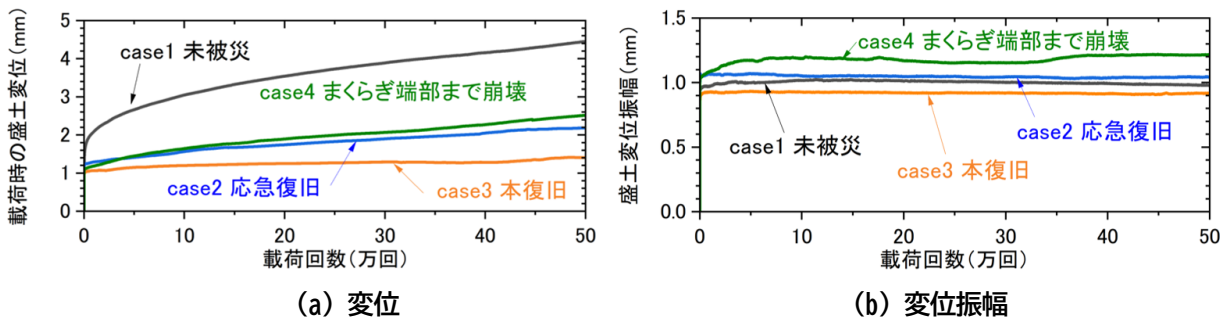


図 15 盛土天端の変位の結果（被災側）

崩壊側の荷重 50 万回時のまくらぎ変位振幅は、case 4 が最も大きくなり、case 1, case 2, case 3 がほぼ等しくなった。これは、大型土のうの設置 (case 2) や腹付け盛土 (case 3) によって、列車荷重に対する崩壊側の盛土の変形を case 1 と同程度に抑制できたためと考えられる。case 4 では、被災により列車荷重を支持する盛土天端の面積が減少することで、崩壊側のまくらぎ下のバラストが徐々に流出したため、まくらぎ変位振幅が徐々に増加する傾向を示したと考えられる。

軌道中央における荷重時の盛土変位および盛土変位振幅を図 15 に示す。ここで、各ケースの盛土天端の変位は各荷重前を 0 mm とした。荷重 50 万回時の盛土変位は、case 1 (未被災), case 4 (まくらぎ端部まで崩壊), case 2 (応急復旧), case 3 (提案復旧法) の順で小さくなった。これは、試験ケースが進むにつれて盛土が安定したため case 1 が最も盛土変位が大きくなったものの、case 4 の盛土変位よりも case 3 の方が小さくなったことから、応急復旧および提案復旧法は盛土沈下を抑制する効果も有していることが確認された。盛土変位振幅は、被災後の応急復旧・提案復旧法を想定した case 2 および case 3 が case 1 と同程度の概ね 1 mm であった。これは、まくらぎ変位と同様に、大型土のうの設置や腹付け盛土による沈下抑制の効果であると考えられる。case 4 では、被災により盛土天端における盛土変位振幅がやや増大した。

以上の試験結果より、被災した盛土に対する応急復旧および提案復旧法によって、まくらぎおよび盛土の変位が被災前と同様に抑制できるため、列車を安全に通過させることが可能であると考えられる。なお、本試験では定性的な評価のため、定量的な評価として次節では沈下解析を実施する。

4.2 累積損傷度理論を用いた提案復旧法の沈下量評価

提案復旧法を適用した盛土の累積沈下特性を評価するため、沈下解析を実施した。図 16 に沈下解析のフローを示す。提案復旧法で用いる大型土のうの中詰め材を盛土材料で、かつ盛土と同じ乾燥密度で作製した場合には、前項の繰返し荷重試験と同様に、提案復旧法を適用することで軌道沈下は未被災時と概ね同程度となることが予想される。そのため、本検討では、稻城砂で構築された高さ 5 m の盛土が被災した状

況を想定し、盛土材料よりも剛性の高いクラッシュランを大型土のうの中詰め材とし、さらに設置した大型土のうを盛土材料で覆土することとした。なお、3章の振動台実験および繰返し载荷試験では盛土材料を大型土のうの中詰め材としたが、本検討では被災により盛土材料が広域に流出し、大型土のうの中詰め材に盛土材料が使用できない状況を想定して、比較的入手しやすいクラッシュランを中詰め材として用いることとした。

沈下解析に用いた二次元有限要素解析モデルを図 17 に示す。また、沈下解析に用いた稲城砂およびクラッシュランの累積沈下パラメータは、既往の文献¹⁴⁾を参考に設定した(表 2)。列車条件は、輪重 80kN の列車が 2 両編成で 1 日 100 本通過するものとし、年間通過軸数は 29.2 万軸/年である。

提案復旧法(上段大型土のう有)、提案復旧法(上段大型土のう無)および盛土再構築における盛土天端の累積沈下量を図 18 に示す。供用 100 年の盛土天端の累積沈下量は、上段大型土のう有で 11.90 mm、提案復旧法(上段土のう有)で 11.90 mm、提案復旧法(上段土のう無)で 11.93 mm、盛土再構築で 12.30 mm であった。列車荷重の影響範囲内⁵⁾に盛土材料よりも剛性の高い材料で作製した大型土のうを設置したため、提案復旧法(上段大型土のう有)および提案復旧法(上段大型土のう無)ともに盛土再構築よりも沈下量はやや小さい。また、盛土上段部における大型土のうの設置の有無による累積沈下量の差は、僅かであった。

以上より、提案復旧法における盛土上部における大型土のうの有無に関して、列車荷重によるバラスト軌道の累積沈下特性の違いは些少であり、盛土の再構築と同等に列車を安全に通過させることが可能であると考えられる。

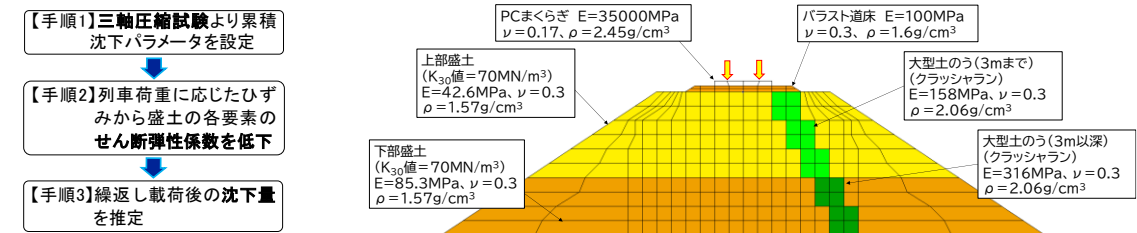
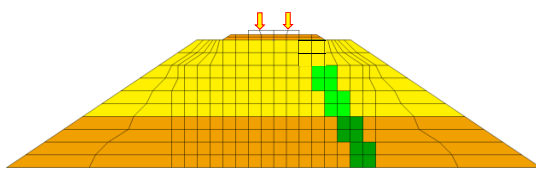
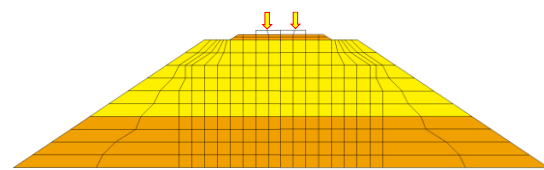


図 16 沈下解析のフロー

(a) 提案復旧法(上段大型土のう有)



(b) 提案復旧法(上段大型土のう無)



(c) 盛土を再構築した場合

図 17 沈下解析に用いた解析モデル

表 2 累積沈下パラメータ

	初期有効拘束圧 σ_r (kN/m ²)	粘着力 c (kN/m ²)	内部摩擦角 ϕ (°)	初期せん断応力 τ_0 (kN/m ²)	繰返しせん断応力 τ_d (kN/m ²)
稲城砂	20	5.2	28	13.75	13.75
クラッシュラン	20	11.3	43	6.25	6.25

	初期せん断応力比 SR_s (kN/m ²)	繰返しせん断応力比 SR_d (kN/m ²)	a_1	a_2	m
稲城砂	0.407	0.407	0.41	0.50	0.053
クラッシュラン	0.238	0.238	15.71	0.93	0.124

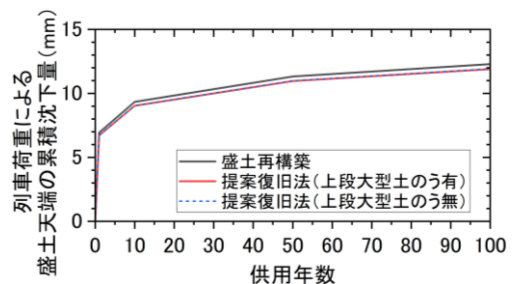


図 18 盛土天端の累積沈下量の比較

5. 従来復旧法と提案復旧法の工事費と工期の比較

高さ 5.0 m の盛土が延長 10.0 m にわたって崩壊した際の復旧を対象に、従来復旧法および提案復旧法により復旧した際の工事費・工期の比較を行った。提案復旧法の仕様は、3.2 節に示した安定解析を用いて L1 地震動を対象に検討し、安定を満足する仕様のうち、最も経済的である最上段の大型土のうのみを撤去する構造を対象とした。

検討断面の概要を図 19 に示す。大型土のうを各段 2 列に、1 : 0.5 勾配で設置して応急復旧した後に本復旧する場合を想定した。従来復旧法を適用する場合には、(1)鋼矢板の打設、(2)土のう撤去、(3)盛土を施工する必要があり、応急復旧時に実施する土のう製作・設置と併せて、積算工種とした。提案復旧法では、従来の復旧で用いられる大型土のうを残置することを想定しており、土のう撤去の数量を低減できるほか、列車防護工として施工する鋼矢板打設を不要としている。

従来復旧法と提案復旧法の工事費と工期の比較を図 20 に示す。なお、本検討で積算した工事費は、直接工事費のみを対象とし、従来復旧法の工事費を 1.0 とした場合の比率で整理した。工期については応急復旧が完了する土のう製作・設置までの施工手順は同様であるため、両者の列車の運行再開までの期間に相違は見られない。本復旧工事完了までの工期に着目すると、従来復旧法は設定した規模の本復旧工事の完了までに 8.4 日を要し、特に鋼矢板の打設に要する期間が大きいことが確認された。提案復旧法により鋼矢板の打設を不要とすることで、本復旧工事完了までの工期を約 60%低減することが可能であることが確認された。従来復旧法において鋼矢板の打設に要する工事費が全体の約 80%を占めており、提案復旧法によって鋼矢板の打設を不要としたことで工事費を約 80%低減することができることがわかる。

なお、本検討による工事費や工期の試算結果は、特定条件下の検討結果であることに留意されたい。

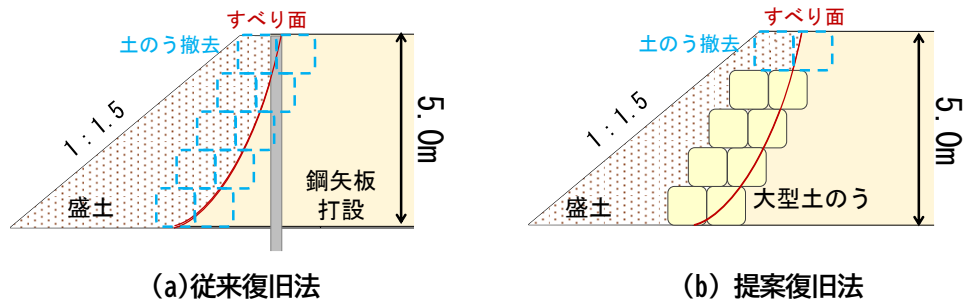


図 19 従来復旧法と提案復旧法の検討断面

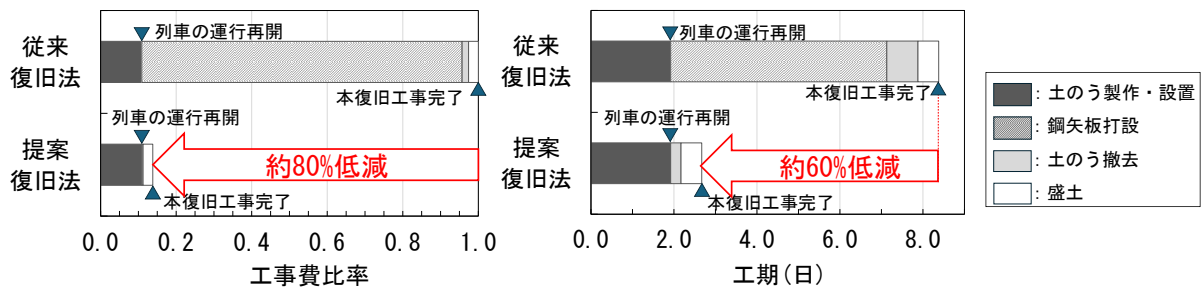


図 20 従来復旧法と提案復旧法の工事費と工期の比較

6. まとめ

近年の気候変動の影響によって生じる極端な気象現象に対して、鉄道システムのレジリエンス向上に向けた鉄道盛土の早期復旧法を提案した。本報告では、耐震性および列車荷重に対する累積沈下特性について報告したが、耐降雨性については既報⁹⁾¹⁵⁾を参照されたい。

列車荷重に対する累積沈下特性は、上部の大型土のうの有無に関わらず、盛土の再構築と同等であったが、耐震性は上部に大型土のうを有する場合に不安定となる傾向が見られた。そのため、提案復旧法では、安定解析に基づき上部の大型土のうの撤去や、腹付け盛土の形状を決定することを想定しているが、ここに示す以外にも所要の性能を満足する方法が考えられる。例えば、軌道に近接して大型土のうが配置されている場合には大型土のうの撤去が困難であるため、地山補強材により上部の土のうを部分補強することで耐震性の向上を図ることが可能である。このように状況に応じて、仕様を決定することが肝要である。

文 献

- 1) 坂本寛章, 小島謙一, 後藤幸司: 棒状補強材により串刺補強した仮復旧盛土の耐震性評価法, 鉄道総研報告, Vol.25, No.2, pp.41-46, 2011
- 2) 森芳徳, 宮武裕昭, 久保哲也, 井上玄己: 大規模土砂災害に対応した新しい災害復旧技術に関する研究, 土木学会論文集 F4 (建設マネジメント), Vol.72, No.4, pp.1_77-I_87, 2016
- 3) 竹川遊大, 佐藤武斗, 松丸貴樹: 大型土のうの前面に覆土を構築する盛土復旧構造の地震時挙動把握のための振動台実験, 土木学会論文集, Vol.81, No.13, 24-13487, 2025
- 4) 佐藤武斗, 松丸貴樹, 森裕昭, 横山大智, 小黒雄介: 大型土のうを本設利用した鉄道盛土復旧構造の変形抑制効果と耐震性評価, ジオシンセティックス論文集, Vol.40, pp.129-140, 2025
- 5) 国土交通省鉄道局監修, 鉄道総合技術研究所編: 鉄道構造物等設計標準・同解説 土構造物, 平成25年改編, 丸善出版, 2013.
- 6) 香川崇章: 土構造物の模型振動台実験における相似則, 土木学会論文報告集, No.275, pp.69-77, 1978
- 7) 篠田昌弘, 石村隆俊, 半井健一郎, 山本俊太, 夏樹敏宏, 加藤鉄弘, 北野靖行, 加藤範久, 内村太郎, 龍岡文夫: プレローディッド・プレストレスト補強土構造物のレベルII地震動に対する動的応答特性, ジオシンセティックス論文集, Vol.15, pp.274-283, 2000
- 8) 国土交通省鉄道局監修, 鉄道総合技術研究所編: 鉄道構造物等設計標準・同解説 土留め構造物, 丸善出版, 2012
- 9) 松丸貴樹, 佐藤武斗, 伊藤壱記, 阿部慶太: 土のうで応急復旧を行った盛土の列車荷重載荷に対する安定及び沈下検討, ジオシンセティックス論文集, Vol.38, pp.114-121, 2023
- 10) 伊藤壱記, 佐藤武斗, 松丸貴樹: 実物大載荷試験による鉄道盛土復旧工の軌道沈下抑制効果の検証, 第60回地盤工学研究発表会, Vol.60, 24-5-2-02, 2025
- 11) 伊藤壱記, 桃谷尚嗣, 景山隆弘, 中村貴久, 川中島寛幸: 累積損傷度理論による列車速度を考慮した新幹線盛土の塑性沈下量の評価, 土木学会論文集, Vol.79, No.7, 22-00265, 2023
- 12) 関根悦夫, 村本勝己: 営業線路盤の支持力特性に関する研究, 鉄道総研報告, Vol.9, No.7, pp.19-24, 1995
- 13) 伊藤壱記, 桃谷尚嗣, 中村貴久, 村本勝己: 発生バラストを再利用した鉄道路盤の改良工法に関する研究, 土木学会論文集 E (舗装工学), Vol.68, No.3 (舗装工学論文集第17巻), 1_79-I_87, 2012
- 14) 景山隆弘, 伊藤壱記, 田島史花, 川中島寛幸, 石川太郎, 阪田暁: トンネル発生土を用いた鉄道盛土における列車走行時の盛土沈下量の推定, 第58回地盤工学研究発表会発表講演集, Vol.58, 11-2-2-08, 2023
- 15) 天野友貴, 佐藤武斗, 松丸貴樹: 覆土を有する大型土のう復旧盛土の散水・載荷模型実験および再現解析, ジオシンセティックス論文集, Vol.39, pp.59-66, 2024

鉄道総研報告 監修スタッフ

■監修責任者

曾我部正道

■編集責任者

小島謙一

■企画・監修

川崎邦弘	重枝秀紀	石毛 真	武内陽子
坪川洋友	渡辺信行	田所敏弥	根津一嘉
桃谷尚嗣	布川 修	福田光芳	平井 力
半田和行	池田 学	宇田東樹	遠藤広晴
富田 優	豊岡亮洋		

鉄道総研報告 第40巻 第7号

2026年7月1日 発行

監修・発行所：公益財団法人 鉄道総合技術研究所

〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38

©2026 Railway Technical Research Institute

本誌に関するお問い合わせ先
総務部広報 電話 042-573-7219

RTRI REPORT

Vol. 40 No. 7

Jul. 2026

PAPERS

- A Machine-Learning-Based Flaw Detection Method for Inspection Data of Bogie Parts
.....K.MAKINO, Y.OGASAWARA (1)
- A Method for Detecting Vehicle Abnormality Using a Single-Link Traction Device
.....S.SAGA, T.IIDA, J.NAKAHASHI (11)
- Long-Term Deformation Prediction of PC Box Girder Bridges Using Strain Analysis Incorporating
Moisture Diffusion
.....R.HASHIMOTO, N.TANAKA, K.WATANABE (21)
- Rapid Restoration Method Using Permanent Large Sandbag for Rainfall Induced Embankment
Failures
.....T.SATO, T.MATSUMARU, K.ITO (31)

