

低温時のロングレール保守作業制限の見直しの提案

玉川 新悟* 西宮 裕騎* 瀨瀬 智也*

New Restrictions of Maintenance Works for Continuous Welded Rails at Low Temperatures

Shingo TAMAGAWA Yuki NISHINOMIYA Tomoya KOKETSU

This study aims to establish new restrictions of maintenance works for continuous welded rails at low temperatures in winter. The authors measured inward rail displacements and changes in axial rail forces caused by maintenance works and performed FEM analyses which simulate maintenance works under various track conditions. On the basis of the measurements and the FEM results, the authors propose the restriction diagrams of track maintenance works which provide allowable decreases in rail temperature from neutral temperatures. Furthermore, the authors propose an assessment flow for users to judge the propriety of maintenance works at low temperatures by using the diagrams. Consequently, new restrictions allow track maintenance works at low temperature conditions exceeding current restrictions.

キーワード：ロングレール，冬季の保守作業制限，道床交換，レール内方変位，レール軸力

1. はじめに

現在，多くの鉄道事業者では，在来線のロングレール区間において，表1に示すように冬季の保守作業を制限している¹⁾。表1では，軌道の曲線半径と1日あたりの施工延長に対して，作業時に許容できる設定温度からの温度低下量（以下，許容温度低下量）を規定している。

本作業制限は，1983年の策定案²⁾を基本としているものであり，作業の機械化や保守計画の効率化が進む近年の状況³⁾⁴⁾を必ずしも想定したものとはいえず，作業の効率化の妨げとなっている。また，施工延長と許容温度低下量は，レールの曲線内方への変位（以下，レール内方変位）防止の観点から決められたものであるが，実際の保守作業がレール内方変位に及ぼす影響は十分に明

らかになっていない。さらに，低温時の作業では，レール内方変位に加えて，当該変位に起因したレール軸力の変化が生じる可能性が考えられ（図1），作業範囲の引張軸力が低下することで，夏季に圧縮軸力が増加し，座屈の発生の危険性が高まることが懸念される。このため，冬季低温時の保守作業が軌道に及ぼす影響を把握したうえで，実測値に裏付けられた根拠に基づいて，論理的に作業制限を体系化する必要がある。

本研究では，冬季低温時の保守作業に伴うレール内方変位とレール軸力の変化を測定するとともに，保守作業を想定した一連のFEM解析を行って新しい低温時の保守作業制限を提案した。なお，本研究では，表1のなかでも特に制限が厳しく，作業の平準化の支障となっている赤枠の保守作業（道床による軌きょうの支持がなくな

表1 冬季低温時のロングレールの保守作業制限(在来線)

| 作業種別 | レール温度が設定温度よりも低い時の作業が可能な条件 | | |
|--|---------------------------|-------|--------------------------------|
| | 対象施工箇所（曲線半径） | 施工延長 | 作業時に許容できる設定温度からの温度低下量（許容温度低下量） |
| 道床突き固め，通り直し，曲線整正，カント付替 | 全区間 | 制限なし | 30°C（制限なし） |
| 道床整理，道床抵抗力に影響が予想される隣接線作業，道床抵抗力試験，その他これに準ずる作業 | 全区間 | 制限なし | 40°C（制限なし） |
| 道床交換，道床ふるい分け，軌道低下，まくらぎ交換・位置直し，レール締結装置補修，軌間直し，その他これに準ずる作業 | 直線及び半径2000m以上の曲線 | 25m以下 | 25°C（制限なし） |
| | 半径2000m未満800m以上の曲線 | 25m以下 | 10°C（10°C） |
| | 半径800m未満の曲線 | 25m以下 | 5°C（5°C） |
| | 全区間 | 5m以下 | 40°C（制限なし） |

- 備考 1 ロングレール幅から25m以内の区間については，いずれの作業についても制限は定めない。
 2 施工箇所を順次進める際は，既施工箇所が完了したのちに行うこと。
 3 連続施工延長に制限のある作業を複数箇所で行う際は，その間を20m以上離すこと。
 4 トンネル内の木まくらぎロングレールについては，（ ）内を適用する。
 5 緊急時及び設定替を行う場合には，この表の制限によらないことができる。ただし，座屈及び過大伸縮を招かないように施工すること。

* 軌道技術研究部 軌道構造研究室

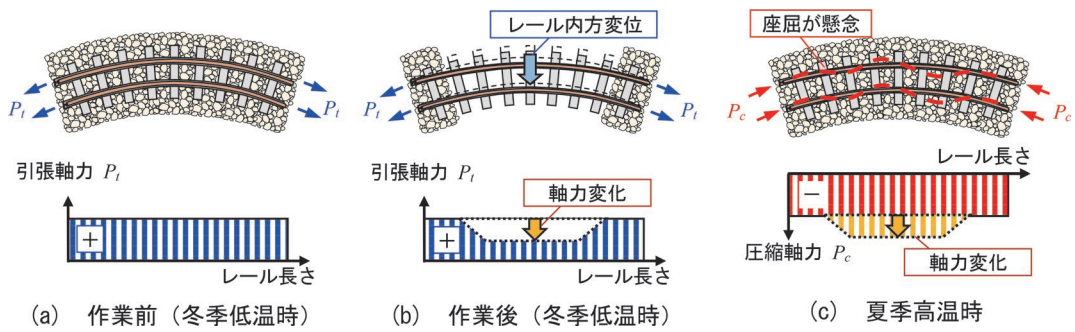


図1 低温時の保守作業に伴うレール内方変位とレール軸力の変化の関係

る道床交換作業等)を対象とした。

2. 低温時作業に伴うレール内方変位とレール軸力の変化の測定

2.1 現地測定の概要

曲線半径400mのロングレール区間において、冬季に道床交換作業を行った際のレール内方変位とレール軸力の変化を測定した。図2に道床交換の作業範囲とレール内方変位、レール軸力とレール温度の測点を示す。道床交換は、総延長16mの範囲を2日間に分けて施工し、1日目と2日目にそれぞれ8mの延長の道床を交換した。

レール内方変位は、内軌の頭部側面と施工基面に固定した基準点の距離の変化を鋼尺により測定することで算定した。レール軸力とレール温度は、レールの腹部にひずみゲージと熱電対を貼付し、静ひずみ測定器を用いて長期間(道床交換日の約1ヵ月前～約8ヵ月後)にわたり連続的に測定した。また、測定終了後に当該レールを切断してレール軸力の開放を行った。

道床交換作業では、バックホーにより道床を掘削・撤去した後に道床を投入し、タイタンバーによる突き固めと、軌道変位が仕上がりが基準値に収まるように高低変位と通り変位の整正を行った。道床交換1日目と2日目の最低レール温度は、それぞれ2.3℃と9.4℃であり、作業可能なレール温度の32℃(設定温度37℃-5℃)を20℃以上下回り、現行の作業制限では許容できない作業であった。なお、前述のレール軸力開放後における

道床交換前の中立温度は、作業範囲の各測点の平均で21.2℃であった。

2.2 レール内方変位の測定結果

図3に道床交換1日目と2日目の各作業前を基準(0mm)として、作業中(道床完全撤去時)と作業後(軌道変位の整正後)のレール内方変位を示す。図3より、作業中と作業後のレール内方変位の最大値は、道床交換1日目でそれぞれ5mmと8mm、2日目でそれぞれ11mmと12mmであった。本結果より、低温時の道床交換作業に起因してレール内方変位が生じることを明らかにした。本作業では、道床交換2日目に於いて通り変位の整正を行っているものの、作業範囲のレールは元の位置には戻らず、作業中に生じたレール内方変位と同程度の変位が作業後も残留することを確認した。

2.3 レール軸力の測定結果

図4に道床交換前後のレール軸力とレール温度の関係を示す。図4の道床交換前後のデータから線形回帰によりレール軸力が0kNとなるレール温度を中立温度として算出し、その差を比較した。この結果、道床交換前後の中立温度の変化量は、表2に示すように-0.34℃～0.17℃であった。この変化量は、ロングレールの設定替や道床整備の可否の判断が必要となる換算付加温度が3.5℃程度⁵⁾であることを考慮すると、十分に小さいことを確認した。

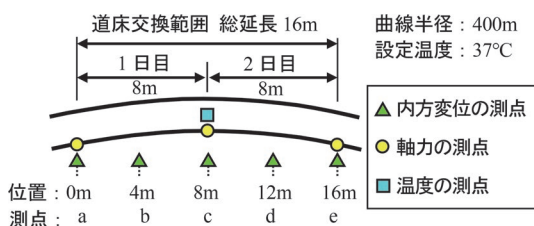


図2 レール内方変位とレール軸力の測点

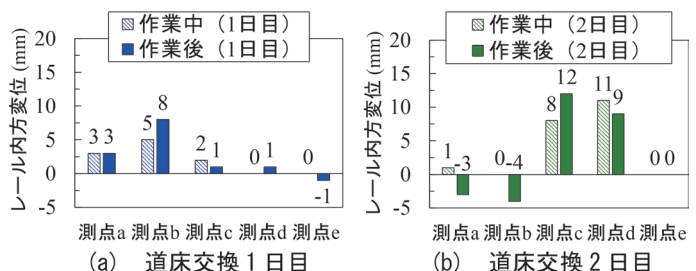


図3 道床交換前を基準とした作業中と作業後の内方変位

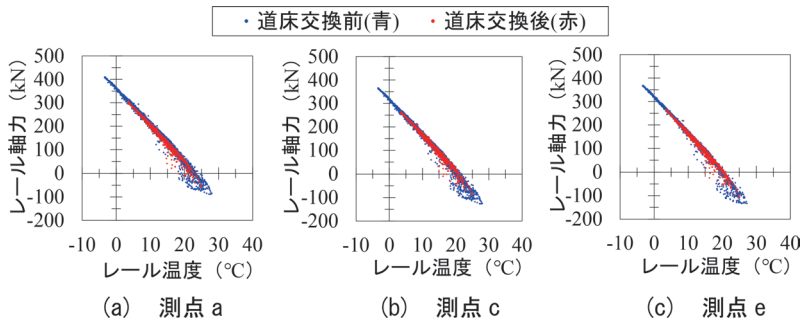


図4 道床交換前後のレール軸力とレール温度の関係

表2 道床交換前後の中立温度 (°C)

| 測点 | 道床交換前 | 道床交換後 | 前後の差 |
|----|-------|-------|-------|
| a | 23.08 | 22.75 | -0.34 |
| c | 20.60 | 20.61 | 0.01 |
| e | 19.83 | 20.00 | 0.17 |

3. 保守作業が軌道に及ぼす影響のFEM解析

合わせとし、全1050ケースの解析結果を整理した。

3.1 FEM解析の概要

保守作業時の温度低下量や施工延長、曲線半径がレール軸力の変化やレール内方変位に及ぼす影響を把握するため、保守作業を想定した軌道のFEM解析を行った。図5に解析モデルを示す。本解析で想定する保守作業は、道床による軌きょうの支持がなくなる作業とし、施工延長 L の範囲の道床のばねを消去することで、施工範囲の軌きょうを無拘束状態としている。本解析は、レールに温度低下を与えた際の挙動を解析する非線形静解析（熱応力解析）とした。なお、解析モデルの妥当性は、前章の測定結果と比較することで確認している⁶⁾。解析ケースは、曲線半径、施工延長および温度低下量の組み

3.2 レール軸力の変化と換算付加温度

図6に解析結果の一例として、温度低下量 40°C の曲線半径 800m 、施工延長 $0\text{m}\sim 30\text{m}$ で得られたレール軸力分布を示す。レール軸力の変化量の最大値は、施工範囲の端部近傍で生じていることが分かる。また、レール軸力の変化量は、温度低下量の増加、施工延長の増加および曲線半径の低下により増加することを確認している。つぎに、全ケースで得られたレール軸力の変化量の最大値をレールのヤング率 \times 断面積 \times 線膨張係数で除し、温度変化量に換算（以下、換算付加温度）して、曲線半径毎に整理した。表3に曲線半径 800m の例を示す。本表は、後述する作業制限において参照するものである。

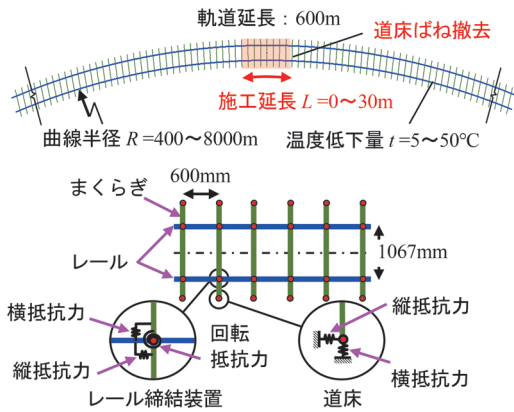


図5 保守作業を想定したFEM解析モデル

3.3 レール内方変位

図7に温度低下量 40°C の曲線半径 800m 、施工延長 $0\text{m}\sim 30\text{m}$ で得られたレール内方変位分布を示す。レール内方変位の最大値は、施工範囲の中央で生じているこ

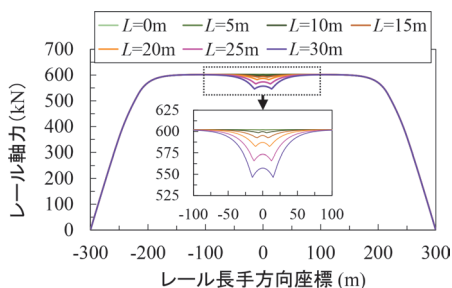


図6 レール軸力分布 (R=800m, t=40°C)

表3 換算付加温度の整理表 (R=800mの例)

| R=800m | 温度低下量(°C) | | | | | | | | | |
|--------|-----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 | 45 | 50 |
| 5 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 10 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.3 | 0.3 |
| 15 | 0.2 | 0.4 | 0.4 | 0.5 | 0.5 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.7 | 0.7 |
| 20 | 0.5 | 0.8 | 0.9 | 1.0 | 1.1 | 1.2 | 1.2 | 1.3 | 1.4 | 1.5 |
| 25 | 1.0 | 1.5 | 1.7 | 1.9 | 2.0 | 2.1 | 2.3 | 2.4 | 2.6 | 2.7 |
| 30 | 1.6 | 2.3 | 2.6 | 2.9 | 3.1 | 3.3 | 3.5 | 3.7 | 3.9 | 4.1 |

※紙面の都合上R=800mのみ掲載、全結果は文献6に掲載

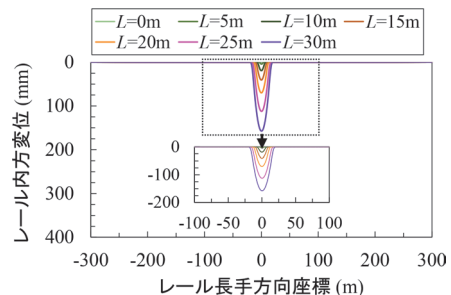


図7 レール内方変位分布 (R=800m, t=40°C)

表4 レール内方変位の最大値の整理表(R=800mの例)

| R=800m | 温度低下量(°C) | | | | | | | | | | |
|-------------|-----------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 | 45 | 50 | |
| 施工延長 (m) | 5 | 0.7 | 1.2 | 1.7 | 2.1 | 2.5 | 2.9 | 3.3 | 3.7 | 4.2 | 4.6 |
| | 10 | 5.3 | 8.5 | 11.1 | 13.1 | 14.8 | 16.3 | 17.6 | 18.7 | 19.9 | 21.0 |
| | 15 | 13.7 | 21.3 | 26.4 | 30.2 | 33.1 | 35.7 | 38.0 | 40.2 | 42.3 | 44.4 |
| | 20 | 26.0 | 39.5 | 47.9 | 53.7 | 58.5 | 62.5 | 66.3 | 69.7 | 73.1 | 76.4 |
| | 25 | 43.6 | 65.5 | 78.4 | 87.7 | 94.9 | 101.2 | 106.9 | 112.0 | 117.1 | 122.0 |
| | 30 | 60.3 | 92.3 | 111.0 | 123.8 | 134.0 | 142.6 | 150.1 | 157.1 | 163.8 | 170.4 |

※紙面の都合上 R=800mのみ掲載、全結果は文献6に掲載

とが分かる。レール内方変位は、温度低下量の増加、施工延長の増加および曲線半径の低下により増加することを確認した。つぎに、換算付加温度と同様に全ケースで得られたレール内方変位の最大値を曲線半径毎に整理した。表4に曲線半径800mの例を示す。本表は、後述する作業制限において参照するものである。

3.4 レール内方変位に伴う10m弦通り変位

次章において、レール内方変位に対する作業制限を検討するための指標として、各ケースで得られたレール内方変位を10m弦通り変位に換算し、その最大値を算定した。ここでは、全ケースについて、レール内方変位後のレール形状を算出し、当該形状の10m弦正ベクトルを計算した後、本値と曲線正ベクトルの差（以下、10m弦通り変位）の最大値を求めた。図8に曲線半径800m、施工延長30m、温度低下量10°C～40°Cにおける10m弦通り変位を示す。レール内方変位に伴う10m弦通り変位は、施工範囲中央で曲線内方（-）へ、施工範囲端部で曲線外方（+）へ生じていることがわかる。つぎに、レール内方変位と同様に全ケースで得られた10m弦通り変位の最大値を曲線半径毎に整理した。表5に曲線半径800mの例を示す。本表は、後述する作業制限において使用するものである。

なお、以上に示した表3～表5に対応する全ケースの結果とその詳細は、文献6にまとめている。

4. 低温時の保守作業制限の提案

現地測定とFEM解析の結果より、低温時作業では、レール内方変位が不可避免的に発生し、これに伴いレール

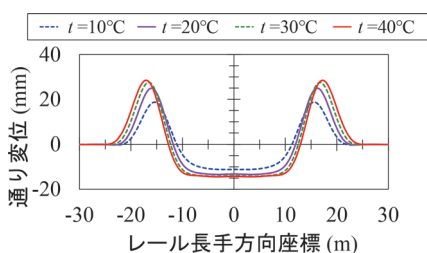


図8 内方変位による10m弦通り変位 (R=800m, L=30m)

軸力に変化が生じることを示した。このため、低温時の作業制限は、レール内方変位の発生とレール軸力の変化をある程度許容したうえで、両者に対して制限を設けることが妥当であると考えられる。

4.1 レール軸力の制限について

低温時作業において問題となるレール軸力の変化は、圧縮方向への変化であるため、これに対する制限は、夏季高温時の座屈防止の観点から決定されるべきである。ここで、夏季に向けて行うロングレールの設定替や道床整備の必要性の有無を検討する際には、レール軸力の変化を温度変化量に換算した換算付加温度が用いられる。このため、鉄道事業者での運用を念頭に置き、本作業制限のレール軸力の変化を表す指標として、表3に整理した換算付加温度を用いることとする。ここで、ロングレールの設定替や道床整備の可否の判断が必要となる換算付加温度は、3.5°C程度であるため⁵⁾、この値を作業制限の目安値として整理することとした。ロングレールの安全度判定においては、表3から得られる換算付加温度をふく進検査等から得られる換算付加温度に加算するものとする。

4.2 レール内方変位の制限について

低温時作業に伴うレール内方変位の制限は、軌道中心と架線の離隔確保や、隣接線との軌道中心間隔、橋りょう、トンネル、ホーム、踏切、電気構造物（電架柱、信号機および標識）等との離隔（主に建築限界）確保の観点から決定されるべきである。

このうち、軌道中心と架線との離隔は、電気設備実施基準規定において250mm以下となっている。また、曲線区間では、トロリ線と軌道中心との変位を最大200mmまでとって架線を設置してよいものとしている。このため、レール内方変位の最大値は、現場の軌道と架線の設置状況により異なるものの、50mm（250mm - 200mm）程度がひとつの目安値と考えられる。一方、その他の離隔については、表4から得られるレール内方変位の最大値が、施工現場毎に決まる離隔の限度値よりも小さくなる範囲で施工するべきである。

表5 レール内方変位に伴う10m弦通り変位の整理表 (R=800mの例)

| R=800m | 温度低下量(°C) | | | | | | | | | | |
|-------------|-----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 | 45 | 50 | |
| 施工延長 (m) | 5 | 0.7 | 1.3 | 1.8 | 2.2 | 2.6 | 3.0 | 3.4 | 3.8 | 4.2 | 4.6 |
| | 10 | 4.4 | 7.0 | 8.8 | 10.1 | 11.1 | 11.8 | 12.4 | 12.8 | 13.2 | 13.5 |
| | 15 | 6.9 | 10.1 | 11.8 | 12.8 | 13.4 | 13.9 | 14.2 | 14.4 | 14.6 | 14.8 |
| | 20 | 8.1 | 11.5 | 13.8 | 15.2 | 16.3 | 17.1 | 17.6 | 18.0 | 18.3 | 18.4 |
| | 25 | 10.3 | 15.5 | 18.6 | 20.5 | 21.8 | 22.7 | 23.2 | 23.7 | 23.8 | 23.8 |
| | 30 | 12.2 | 18.9 | 22.8 | 25.1 | 26.7 | 27.7 | 28.2 | 28.5 | 28.4 | 28.3 |

※紙面の都合上 R=800mのみ掲載、全結果は文献6に掲載

上記に加えて、レール内方変位による10m弦通り変位が大きい場合、道床交換後の通り変位が静的仕上がり基準値4mm（施工当夜：最大値7mm）に収まらず、施工不良となることが懸念される。このため、レール内方変位の最大値に加え、表5に示すレール内方変位による10m弦通り変位の最大値に対して制限を設ける必要がある。ただし、保守作業当夜や引継検査前までに通り整正が可能な値は、保守間合や作業人数、作業方法等により異なるため、一律に制限値を設ける必要はないと考える。そこで以降では、鉄道事業者が通り整正の量を選択することを前提とし、当該変位について、5mm、10mm、15mm、20mmを作業制限の目安値として整理することとした。

なお、通り変位の目安値を10m弦で整理した理由は、10m弦で軌道変位を管理している多くの鉄道事業者や作業員による経験上の判断を容易にするためである。一方で、軌道線形の変化に伴う乗り心地の悪化などに配慮する場合は、より長波長域を対象とした20m～40m弦の軌道変位に対して目安値を設けることも可能である。

4.3 作業制限の提案

本節では、換算付加温度に対する目安値（3.5℃）、レール内方変位に対する目安値（50mm）、レール内方変位に伴う10m弦通り変位に対する目安値 v （5mm、10mm、15mm、20mm）を設けた場合の作業制限を整理した。

施工延長5m、10m、15m、20m、25m、30mの場合について、表3の各値が3.5℃以下、表4の各値が50mm以下で、かつ表5の各値が5mm以下、10mm以

下、15mm以下、20mm以下となる温度低下量の最大値を許容温度低下量とし、曲線半径毎に図化（以下、作業制限図）した。図9に作業制限図を、図10に作業制限図を適用する際の評価フローを示す。図10より、曲線半径 R や施工延長 L 、施工当日に予想される温度低下量 t などの施工計画が決まると、まず、隣接構造物への支障の有無を表4に示すレール内方変位の最大値により判断する。支障がなければ、つぎに10m弦通り変位の目安値 v を選択したうえで、対応する作業制限図を図9より選択し、許容温度低下量 T が温度低下量 t よりも大きいことを確認することで、作業が可能と判断できる。作業後は、表5の換算付加温度を記録することで、夏季のロングレールの安全度判定に活用する。

ここで、図10の適用にあたり、下記の項目を提案する。

- ① 複数日で連続して作業する場合は、1日毎の施工延長を L として図10を適用する
- ② ロングレール端から25m以内の区間については、作業制限を定めない
- ③ 1日に複数箇所を同時に施工する場合は、その間を20m以上離す
- ④ 緊急時および設定替を行う場合には、図10の対象外とする
- ⑤ トンネル内の木まくらぎロングレールについても図10を適用する。

上記の①について、2章の現地測定では1日目と2日目の間に生じたレール内方変位は0～1mm程度と小さいことを確認しているため、作業制限は1日毎の施工で適用すればよいと考える。上記の②～④は、現行の作業制限と同じである。また、⑤について、現行の作業制限

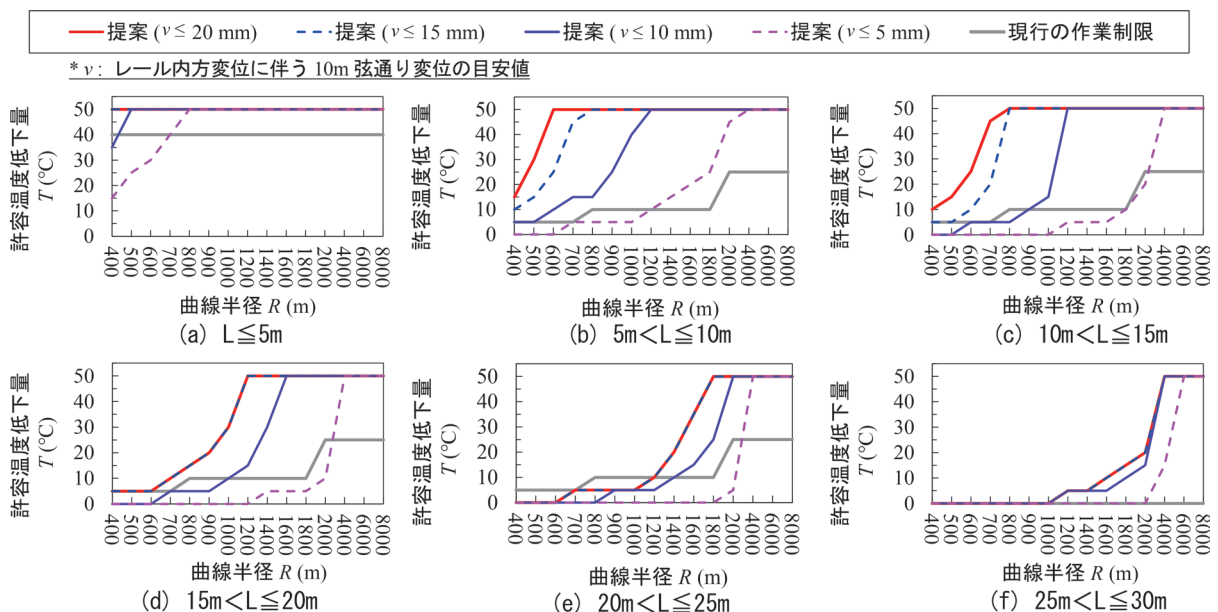


図9 低温時の作業制限図(施工延長L毎に図化)

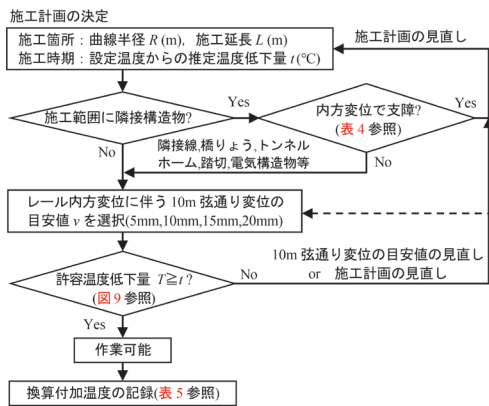


図10 低温時作業の可否の評価フロー

ではロングレール構造を区別して制限を緩和しているものの、提案した作業制限では、一般的に現行の制限を緩和しているため、本構造を区別する必要はないと考える。

図11に、提案する作業制限の適用例として、施工延長 $10\text{m} < L \leq 15\text{m}$ 、 10m 弦通り変位の目安値 10mm における作業制限図を示す。現行の作業制限では、一般的な設定温度 $30^\circ\text{C} \sim 35^\circ\text{C}$ の場合、最低温度が 5°C を下回る冬季（温度低下量 25°C 以上）に可能な作業は実質的に 5m 以下であった。一方で、提案する作業制限では、曲線半径 1200m 以上において、許容温度低下量が 25°C を上回り、冬季に 15m 以下の作業が可能となる。これは、バックホーによる最大施工延長 $10\text{m} \sim 12\text{m}/\text{日}$ を上まわっており、冬季の作業効率率は2倍以上となる。

提案する作業制限では、現行の作業制限を緩和した施工が可能となる。ただし、現行の制限を超過した施工事例が少ないため、今後施工実績を増やしていくとともに、従来の施工延長を大きく（例えば 20m 以上）上回る場合には、作業後の突き固めを入念に行うことが重要であると考える。

4.4 本作業制限を適用する保守作業について

本稿では、レール内方変位の発生と残留を一部許容したうえで、主に道床による軌きょうの支持がなくなる保守作業（道床交換等）を対象として作業制限を提案した。このため、表1の赤枠内において、レール内方変位が許容できる道床交換、道床ふるい分け、軌道低下、まくらぎ交換・位置直しについて、4.3節の作業制限を適用することを提案する。一方で、レール締結装置補修と軌間直しについては、まくらぎの位置が不動で、レール内方変位によりレールのみが移動した場合、手直しが困難となるため、提案した作業制限は適用できない。ただし、これらの作業については、 5m 以上の延長で同時にレール締結装置を緩解するケースは少ないと考えられるため、現行の作業制限で問題はないと考える。さらに、MTT作業を含む表1の赤枠外の作業については、施工延長に制限がないうえ、許容温度低下量も $30 \sim 40^\circ\text{C}$ と

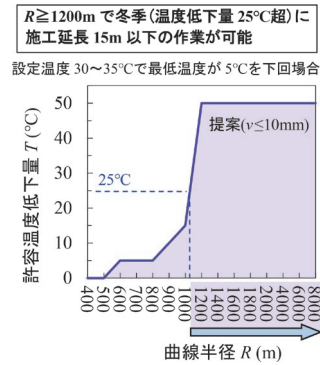


図11 作業制限図の適用例

($10\text{m} < L \leq 15\text{m}$, 10m 弦通り変位目安値 10mm)

高めに設定されているため、作業の平準化の観点から、現行の作業制限で問題はないと考える。

5. まとめ

本研究では、冬季低温時に軌道の保守作業を行う場合の新しい低温時の保守作業制限について検討した。主な結果は以下のとおりである。

- ① 道床交換作業では、作業後に通り変位の整正を行っているが、作業範囲のレールは元の位置には戻らず、作業中に生じたレール内方変位と同程度の変位が残留することを確認した。
- ② 道床交換作業の前後におけるレール軸力の変化量は、今回の施工条件において、中立温度の変化量に換算して 1°C 以内の小さい値であることを確認した。
- ③ 保守作業に伴うレール軸力の変化の温度換算値（換算付加温度）とレール内方変位および当該変位に起因した 10m 弦通り変位に目安値を設定し、施工延長および曲線半径毎に許容温度低下量を整理した作業制限図を提案した。
- ④ 施工区間の隣接構造物への支障の有無をレール内方変位の最大値で判断し、許容温度低下量を上記③の作業制限図で算定することで、任意の施工条件に対して低温時作業が可能か否かを判断する評価フローを提案した。一例として 10m 弦通り変位の目安値を 10mm とした場合、最低温度が 5°C を下回る冬季（温度低下量 25°C 以上）においても、曲線半径 1200m 以上で 15m 以下の作業が可能となることを示した。

文献

- 1) 川口昭人：ロングレールの保守作業制限，新線路，Vol.65, No.7, pp.34-37, 2011
- 2) 家田仁：ロングレール敷設区間における保守作業制限の改正（案）および解説，鉄道線路，Vol.31, No.8, pp.18-22, 1983
- 3) 一宮大輔：道床交換機の施工状況，新線路，Vol.72, No.9, pp.17-19, 2018
- 4) 三和雅史，山本修平，松本麻美，大島崇史，吉田尚史：中長期軌道保守の効率化のための軌道状態予測・保守計画，鉄道総研報告，Vol.33, No.2, pp.11-16, 2019
- 5) 玉川新悟，西宮裕騎，太田晋一，中野哲弥：冬季低温時の道床交換作業が急曲線ロングレールのレール内方変位とレール軸力の変化に及ぼす影響，日本機械学会論文集，Vol.86, No.889, 2020
- 6) 玉川新悟，西宮裕騎，額綱智也：冬季の道床交換作業がロングレール軌道に及ぼす影響のFEM解析と低温時作業制限の提案，日本機械学会論文集，Vol.87, No.898, 2021