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

玉川 新悟^{*1}, 西宮 裕騎^{*1}, 瀬瀬 智也^{*2}

FEM analysis of the effects of the ballast renewal work on continuous welded rails and proposal of the new restriction of work at a low temperature

Shingo TAMAGAWA^{*1}, Yuki NISHINOMIYA^{*1} and Tomoya KOKETSU^{*2}

^{*1, *2}Track Technology Division, Railway Technical Research Institute
2-8-38 Hikari-cho, Kokubunji-shi, Tokyo 185-8540, Japan

Received: 13 January 2021; Revised: 18 March 2021; Accepted: 7 May 2021

Abstract

This study aims to establish a new restriction of ballast renewal works at a low temperature in winter. The authors construct a FEM model of railway track which simulates the ballast renewal work at a low temperature and perform the FEM analysis under the various conditions of track radius of curvatures R , length of ballast renewal work L and decrease in rail temperatures Δt . As a results, it becomes clear that the inward rail displacements and changes in axial rail forces increased with the decrease in R , and the increase in L and Δt . Based on FEM results, the authors propose the restriction diagrams of ballast renewal work which provide the allowable decrease in rail temperatures from the neutral temperatures of rail newly welded under the restriction of converted temperature of changes in rail forces, inward rail displacements and alignment defects due to inward displacements. Furthermore the authors propose the flow for users to judge propriety of ballast renewal work at a low temperature by use of the restriction diagrams. Consequently, the ballast renewal work at a low temperatures exceeding the current restriction can be executed.

Keywords : Railway, Ballast renewal work, Restriction of works at a low temperature, Continuous welded rail, FEM

1. 緒 言

鉄道の標準的な軌道構造であるバラスト軌道は、レールを締結したまくらぎをバラスト道床（以下、「道床，Ballast」）で支持する構造を有する。道床は、構成材料であるバラストの細粒化や噴泥等によりその性能が低下するため、図 1 に示すように劣化箇所の計画的な交換（以下、「道床交換，Ballast renewal」）が必要となる。

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道床交換作業を制限している（川口，2011）。表 1 では、レール軸力が 0 kN となるように設定したレールの敷設時の温度（以下、

Fig.1 Construction example of ballast renewal work. At first, the workers drill and remove the old ballast by backhoe (a). After the drilling, the workers throw the new ballast in the renewal area where rails and sleepers are set without the supports of ballast (b), (c). After that, the workers adjust the track irregularity and tamping the new ballast (d).

No.21-00030 [DOI:10.1299/transjsme.21-00030], J-STAGE Advance Publication date : 17 May, 2021

^{*1} 正員，鉄道総合技術研究所 軌道技術研究部（〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38）

^{*2} 鉄道総合技術研究所 軌道技術研究部

E-mail of corresponding author: tamagawa.shingo.15@rtri.or.jp

Table 1 Restriction of ballast renewal works at a low temperature in winter (Kawaguchi, 2011). Allowable decrease in rail temperatures are provided with respect to the radius of curvatures and the length of ballast renewal work.

Radius of curvatures : R	Length of ballast renewal work : L	Allowable decrease in rail temperatures from the neutral temperatures of rail newly welded : Δt_a
Straight lines and curved lines with $R \geq 2000$ m	$25 \text{ m} \geq L$	25 °C
Curved lines with $2000 \text{ m} > R \geq 800$ m	$25 \text{ m} \geq L$	10 °C
Curved lines with $R < 800$ m	$25 \text{ m} \geq L$	5 °C
All sections	$5 \text{ m} \geq L$	40 °C

*There is no restriction at the area under 25 m from the end of a continuous welded rail
*The successive work should be performed after the current work.
*Separate restrictions shall apply to the work at the area with wooded sleepers in tunnels.
*The restriction shall not apply to the work in the case of the emergency

Fig.2 Balance of the component force W of rail axial force P and the ballast resistance force g at the curved line with radius of a curvature R . The force $g \cdot (R \cdot d\phi)$ acts on the BB'. The component force W is calculated as $g \cdot (R \cdot d\phi) \cdot \cos\phi$. The sum of W between AA' is balanced with the OX direction component of P . As results, Eq. (1) is completed (Kawaguchi, 2011).

「設定温度，Neutral temperature of rail newly welded」）を基準として，軌道の曲線半径と 1 日あたりの道床交換延長（以下，「施工延長，Length of ballast renewal work」）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，Allowable decrease in rail temperature」）を規定している．本作業制限は，軌道の保守作業全般に対する 1983 年の策定案（家田，1983）を基本としているものの，作業の機械化や保守計画の効率化が進む近年の状況（一宮，2018）（三和他，2019）を想定したものではなく，作業の効率化の要望に支障している．

ここで、表 1 の許容温度低下量は、主にレールの曲線内方への変位（以下、「レール内方変位、Inward rail displacement」）防止の観点から決められている。すなわち、図 2 に示すように、曲線半径 R の区間で、レール軸力 P による求心方向の分力 W と道床の求心方向の抵抗力（道床横抵抗力） g のつり合い条件より決定されている（川口，2011）。図 2 の B 点に 1 m あたり g の道床横抵抗力が働いた場合、BB' 間には $g \cdot (R \cdot d\varphi)$ の力が働き、OX 方向の分力 W は、 $g \cdot (R \cdot d\varphi) \cdot \cos\varphi$ となる。この力を AA' 間で合計した値が、レール軸力 P の OX 方向成分とつり合うことから次式が成立する。

$$P = g \cdot R \quad (1)$$

ここで、道床横抵抗力 g は、バラストの掻き出し等により、まくらぎ底面の摩擦抵抗力のみとし、摩擦係数が 0.1 程度となると仮定すると、軌きょう重量を片側 1.86 kN/m として、0.186 kN/m となる。このため、曲線半径 600 m の場合、式(1)より、 $P=112$ kN となり、これをレールのヤング率(2.058×10^5 N/mm²)、断面積(64.2 cm²)および線膨張係数(1.14×10^{-5} /°C)の積で除すことで温度変化量 Δt_a に換算して 7.4 °C とし、端数を処理して 5 °C としている。同様の計算により、曲線半径 800 m の場合は $\Delta t_a = 10$ °C、曲線半径 2000 m の場合は $\Delta t_a = 25$ °C としている。また、施工延長を 25 m 以内としているのは、これ以上の延長を一度に施工すると、道床の緩みの回復が遅く、作業後の温度変化によりレール内方変位やレールのふく進の発生が懸念されること、および作業中に不測の温度変化等があった場合の影響を最小限に留めるためであるとしている。さらに、施工延長が 5 m 以下の場合については、過去の保守経験より、著しいレール内方変位が生じることはないと考え、現作業制限の発足当時におけるロングレールの敷設可能範囲の上限である 40 °C としている。

以上が表 1 に示す作業制限の根拠である。しかしながら、許容温度低下量の計算において、まくらぎ底面の摩擦係数を 0.1 と仮定した道床横抵抗力を考慮しているものの、道床交換時に一時的に軌きょうが道床から支持されない状態になることが考えられるうえ、摩擦係数の値には十分な根拠がない。また、施工延長について、過去の経験をもとにしているものの、制限値との間には論理的な根拠が示されていない。さらに、上記では主にレール内方変位の観点から作業制限を検討しているものの、低温時作業では、当該変位に起因したレール軸力の変化

Fig.3 Inward rail displacements and change in axial rail forces caused by the ballast renewal work at a low temperature in winter. Tensile axial forces act on rails at a low temperature in winter (a). The ballast renewal work in winter can cause the inward rail displacements and change in axial rail forces (b). On the other hand compressive axial forces act on rails at a high temperature in summer. Therefore there is a possibility that the change in axial rail forces caused by the work in winter causes the track buckling at a high temperature (c).

が生じる可能性が考えられる。すなわち、図3に示すように、引張軸力が生じている冬季に道床を撤去する作業を行った場合、作業範囲の引張軸力が緩和して圧縮方向に変化することで、圧縮軸力が増加する夏季には、これが付加軸力となり、座屈の発生に与える影響が懸念される。

以上の背景に基づき、著者らは、作業制限を再構築するための検討の一環として、急曲線ロングレール区間で道床交換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、本作業が軌道に及ぼす影響を把握している（玉川他，2020）。本検討に引き続き、本稿では、道床交換作業を想定した一連のFEM解析を行い、曲線半径と施工延長、温度低下量がロングレール軌道に及ぼす影響を把握することで、新しい作業制限について検討した。

2. 道床交換を想定したFEM解析

本章では、道床交換作業を想定したFEM解析モデルを用いて、曲線半径と施工延長、温度低下量を変化させたパラメトリック解析を行い、これらがロングレール軌道に及ぼす影響を整理した。

2・1 解析モデル

図4に低温時の道床交換作業を想定した軌道のFEM解析モデルを示す。解析モデルは、軌道延長600m、曲線半径 R の円曲線軌道である。レールとまくらぎは梁要素でモデル化している。まくらぎ間隔は600mm、まくらぎ総数は1000本とし、軌間は1067mmとした。レール締結装置はばね要素でモデル化し、レールとまくらぎの3自由度(u , v , θ_w)を結合している。道床はばね要素でモデル化し、まくらぎと固定点の2自由度(u , v)を結合している。本稿では、円曲線の中心を原点とする円筒座標系を(θ , r , z)で表し、 θ , r , z 方向の並進変位を u , v , w 、回転変位を θ_u , θ_v , θ_w で表す。また、円曲線の中心を原点とする直交座標系を(x , y , z)で表す。なお、一般的な円筒座標系の θ 座標は角度を表すものの、本稿では便宜上、円弧長を表すものとする。

本解析モデルでは、過去の現地測定（玉川他，2020）において、施工範囲の道床を完全に撤去した際にレール内方変位が生じた結果を踏まえ、施工延長 L の範囲の道床のばね(u , v , θ_w)を除去することで、施工範囲の軌きょうを無拘束状態とした。解析モデルの拘束条件は以下のとおりとした。

- ・レール : すべての節点で $w=0$, $\theta_u=0$, $\theta_v=0$
- ・まくらぎ : すべての節点で $w=0$, $\theta_u=0$, $\theta_v=0$
- ・固定点 : すべての節点で $u=0$, $v=0$, $w=0$, $\theta_u=0$, $\theta_v=0$, $\theta_w=0$

表 2 に解析モデルの基本諸元を示す。レールは 50kg N レールとし、まくらぎの諸元は PC まくらぎを想定した値とした。また、レール締結装置は PC まくらぎ用レール締結装置を想定した値とし、道床抵抗力はバラスト軌道で一般的に使用される値とした。

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。解析ソフトは NX Nastran (Ver.10) を用いた。レールの温度低下量は最大で 50 °C とした。レールの初期温度は 0 °C としたため、温度低下量が中立温度（Neutral temperature）からの低下量となる。なお、中立温度とは、レール軸力が 0 kN となるレール温度であり、ロングレールの敷設直後は設定温度と一致し、敷設後はレールのふく進等によりその値が変動する温度である。

以降に示す解析では、レール軸力について引張を正とし、レール内方変位について曲線内方（原点方向）への変位を正とした。また、曲線の内側と外側のレールで有意な差がみられなかったことから、曲線内側のレールで得られた結果を整理した。

Fig.4 FEM model of railway track which considers the ballast renewal work at a low temperature. The model is composed of rails, sleepers, rail fastenings and ballast. In order to simulate the ballast renewal work, the ballast springs (longitudinal and lateral resistance) at the working area are removed and the decreases in temperature are provided in rails between 0 °C to 50 °C.

Table 2 Main parameters of the FEM model.

Items		Values	Items		Values
JIS 50 kg N rail	Young's modulus	2.058×10 ⁵ N/mm ²	PC sleeper	Young's modulus	3.3×10 ⁴ N/mm ²
	Poisson's ratio	0.3		Poisson's ratio	0.2
	Expansion coeff.	1.14×10 ⁻⁵ /°C		Cross section area	2.84×10 ⁴ mm ²
	Cross section area	6.42×10 ³ mm ²		Sleeper span	600 mm
	Moment of inertia of area (<i>r</i> -axis)	1.96×10 ⁷ mm ⁴		Length	2000 mm
	Moment of inertia of area (<i>z</i> -axis)	3.22×10 ⁶ mm ⁴	Ballast	Longitudinal resistance	g_{u0} =8.0 N/mm b =1.0 mm g_u = $g_{u0} \times u / (u + b)$
Rail fastenings	Longitudinal resistance	9.0×10 ⁴ N/mm		Lateral resistance	g_{v0} =4.0 N/mm a =1.0 mm g_v = $g_{v0} \times v / (v + a)$
	Lateral resistance	1.0×10 ⁵ N/mm			
	Rotational resistance	2.76×10 ⁷ N·mm/rad			

2・2 解析モデルの妥当性検証

解析モデルの妥当性を検証するため、過去に実施した低温時の道床交換作業の現地測定結果（玉川他，2020）との比較を行った。

2・2・1 道床交換作業と現地測定の概要

表 3 に比較に用いた道床交換作業の施工条件を示す。本作業は 2020 年 1 月 21 日と 22 日の夜間に行われており、曲線半径 400 m のロングレール軌道において、1 日目、2 日目ともに施工延長 8 m の道床を交換している。本現場における一連の道床交換前の中立温度（Neutral temperature）は、既発表文献（玉川他，2020）の掲載後の 2020

年 10 月に、ひずみゲージが接着された当該レールを切断してレール軸力を開放することで、21.2 °Cと算定している。

表 4 に現地測定で得られた道床交換前後におけるレール内方変位の最大値と中立温度の変化量を示す。表中のレール内方変位は、道床交換後に最大のレール内方変位が生じた測点のものである。また、中立温度の変化量は、作業範囲の各測点で得られた変化量の最大値と平均値である。なお、表中の中立温度の変化量は、2020 年 10 月にレールを切断して得られた道床交換前の中立温度と道床交換後の中立温度の差として算定した値である。

Table 3 Ballast renewal work condition (Tamagawa et al.,2020).

Items	Values
Radius of curvature	400 m
Length of ballast renewal work	First day of work
	Second day of work
Neutral temperature of rail newly welded	37 °C
Neutral temperature before the work	21.2 °C

Table 4 Measurements of inward rail displacements and changes in neutral temperature caused by the ballast renewal work.

Items	Values
Inward rail displacements after work	First day of work
	Second day of work
Changes in neutral temperature	Maximum values
	Mean values

*The inward rail displacements given in parentheses are the values measured at a middle point of the work when old ballast is removed, and rails and sleepers are set without the supports by the ballast.

2・2・2 FEM 解析結果

図 4 に示した解析モデルに対し、曲線半径を 400 m、施工延長を 8 m とし、上記の中立温度 21.2 °Cと作業 1 日目と 2 日目に測定したレール温度の差を与えた解析を行った。測定したレール温度は、道床の完全撤去時を含んだ作業時間帯（1:00～3:00）で、1 日目に平均値 $m=12.1$ °C、標準偏差値 $\sigma=2.8$ °C、2 日目に平均値 $m=11.2$ °C、標準偏差値 $\sigma=0.7$ °Cであったため、時間帯によるバラツキを考慮し、 m と $m\pm\sigma$ のケースを設定した。

表 5 と表 6 に本解析で得られたレール内方変位と中立温度の変化量の最大値を示す。なお、FEM 解析における中立温度の変化量は、解析で得られたレール軸力の変化量を表 2 のレールのヤング率と断面積および線膨張係数の積で除して算定している。表 5 より、レール内方変位の解析値は、表 4 の測定値と比較して最大で 2 mm 程度の差がみられるものの、概ね一致していることがわかる。また、表 6 の中立温度の変化量の解析値は、現地測定の最大値と 0.2 °C程度の差がみられるものの、本条件における中立温度の変化量が十分に小さく、測点毎にばらつきがみられたこと、および現地測定の平均値-0.17 °Cと概ね一致することを踏まえると、本解析モデルの精度に問題はないと考える。

Table 5 FEM results of maximum values of inward rail displacements. The differences between the FEM results and measurements show in Table 4 are 2 mm or less.

(a) The first day of work				(b) The second day of work			
Decrease in rail temperature	6.3 °C $t_n-(m+\sigma)$	9.1 °C t_n-m	11.9 °C $t_n-(m-\sigma)$	Decrease in rail temperature	9.3 °C $t_n-(m+\sigma)$	10.0 °C t_n-m	10.7 °C $t_n-(m-\sigma)$
Inward rail disp.	6.3 mm	8.8 mm	11.0 mm	Inward rail disp.	8.9 mm	9.5 mm	10.1 mm

* t_n : neutral temperature, m and σ : mean values and standard deviations of rail temperature in the first and second day of ballast renewal work

Table 6 FEM results of maximum values of changes in neutral temperature. The differences between the FEM results and measurements of maximum values show in Table 4 are about 0.2 °C. The FEM results are in good agreement with the measurements of mean values. Therefore the validity of the FEM model is confirmed.

(a) The first day of work				(b) The second day of work			
Decrease in rail temperature	6.3 °C $t_n-(m+\sigma)$	9.1 °C t_n-m	11.9 °C $t_n-(m-\sigma)$	Decrease in rail temperature	9.3 °C $t_n-(m+\sigma)$	10.0 °C t_n-m	10.7 °C $t_n-(m-\sigma)$
Change in neutral temperature	-0.10 °C	-0.14 °C	-0.18 °C	Change in neutral temperature	-0.15 °C	-0.16 °C	-0.17 °C

* t_n : neutral temperature, m and σ : mean values and standard deviations of rail temperature in the first and second day of ballast renewal work

2・3 曲線半径と施工延長、温度低下量が軌道に与える影響の解析

曲線半径と施工延長、温度低下量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、これらの条件を変化させた FEM 解析を行った。

解析ケースは、表 7 に示す組み合わせとし、全 1050 ケースの解析結果を整理した。表中の最大施工延長 30 m は、バックホウによる道床交換が 10 m～12 m/日程度(一宮, 2018)、道床交換機による道床交換が 25 m/日程度(一宮, 2018)であることを踏まえて決定した。最大温度低下量 50 °C は、現行のロングレールの敷設基準(須田他, 1997)において許容できる最大の温度低下量とした。

Table 7 Radius of curvatures, length of ballast renewal work and decrease in rail temperature of FEM analysis. The analyses are performed with the combination of the following conditions. Total number of times of calculation is 1050.

Items	Symbols	Values
Radius of curvatures	R (m)	400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000, 1200, 1400, 1600, 1800, 2000, 4000, 6000, 8000
Length of ballast renewal work	L (m)	0, 5, 10, 15, 20, 25, 30
Decrease in rail temperature	Δt (°C)	5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50

2・3・1 レール軸力の変化

図 5 に曲線半径 400 m, 施工延長 0 m, 温度低下量 10 °C～50 °C におけるレール軸力分布を示す。レール軸力分布は台形状になっていることがわかる。また、レール軸力の最大値は、温度低下量の増加に伴い大きくなっている。レール軸力の最大値は、図中の点線で示すロングレールの理論値(レールのヤング率、断面積、線膨張係数、温度変化量の積)(加藤, 1987)と一致し、曲線半径によらず同じであることを確認している。

図 6 に曲線半径 400 m, 施工延長 0 m～30 m, 温度低下量 50 °C におけるレール軸力分布を示す。レール軸力は、施工範囲とその前後数 m の範囲において圧縮方向に変化していることがわかる。また、レール軸力の変化量は、施工範囲の端部近傍で最大となっており、施工範囲の中央では上に凸の軸力分布となっている。この分

Fig.5 Distribution of axial rail forces in the longitudinal direction of rails ($R=400$ m, $L=0$ m, $\Delta t=10-50$ °C). Maximum values of FEM (solid lines) agree well with the theoretical values (dotted lines).

(a) Whole figure

(b) Enlarged figure

Fig.6 Distribution of axial rail forces ($R=400$ m, $L=0-30$ m, $\Delta t=50$ °C). Axial rail force changes into the compressive direction at the ballast renewal area.

(a) Effects of R ($L=30$ m)

(b) Effects of Δt ($L=30$ m)

(c) Effects of L ($R=400$ m)

Fig.7 Effects of radius of curvatures R , decrease in rail temperature Δt and length of ballast renewal work L on the maximum change in axial rail force. The changes in axial rail force are increased with an decrease in R , an increase in Δt and an increase in L .

布形状は、軌きょうの曲げ剛性によるものである。すなわち、施工範囲のレールは、レール締結装置を介してまくらぎと梯子状に連結されることから、レールが完全に無拘束状態となる場合と比較して、レール締結装置の抵抗力に起因した曲げ剛性を有する。この曲げ剛性により、レールが無拘束状態の場合と比べて、施工範囲中央におけるレールの変形が抑制されている。なお、施工範囲のレール締結装置のばね要素を撤去した場合、施工範囲の軸力分布は、上に凸とはならず、一定になることを確認している。

図 7(a)に施工延長 30 m におけるレール軸力の変化量の最大値と曲線半径の関係を示す。図 7(b)にレール軸力の変化量の最大値と温度低下量の関係を示す。また、図 7(c)に曲線半径 400 m におけるレール軸力の変化量の最大値と施工延長の関係を示す。さらに、付録の表 A に全解析ケースにおけるレール軸力の変化量の最大値を示す。なお、これらの値は、施工延長 0 m のレール軸力からの変化量の最大値とし、圧縮方向への変化を正としている。図 7 と表 A より、レール軸力の変化量は、曲線半径の減少、温度低下量の増加および施工延長の増加に伴い大きくなる。また、レール軸力の変化量は、温度低下量の増加に対しては増加率が一定になる傾向を示す一方で、曲線半径の減少と施工延長の増加に対しては、増加率が顕著に大きくなる傾向を示している。

2・3・2 レール軸力の変化の温度換算値（換算付加温度）

一般的に鉄道事業者では、軌道の保守作業やレールのふく進等により付加されるレール軸力の変化を管理する際に、レール軸力の変化量をレールのヤング率と断面積および線膨張係数の積で除して温度変化量に換算した値（以下、換算付加温度、Converted temperature）が用いられる。そこで、前項で得られた付録の表 A の値をレールのヤング率と断面積および線膨張係数の積で除して換算付加温度とした。付録の表 B に結果を示す。表 B より、換算付加温度は、レール軸力の変化量と同様に、曲線半径の減少、温度低下量の増加および施工延長の増加に伴い大きくなっている。

2・3・3 レール内方変位

図 8 に曲線半径 400 m、施工延長 0 m～30 m、温度低下量 50 °C におけるレール内方変位分布を示す。レール内方変位は、施工範囲とその近傍において生じており、施工範囲の中央で最大となっていることがわかる。

Fig.8 Distribution of inward rail displacements ($R=400$ m, $L=0-30$ m, $\Delta t=50$ °C). Inward rail displacements are generated at ballast renewal work area.

Fig.9 Effects of radius of curvatures R , decrease in rail temperature Δt and length of ballast renewal work L on the maximum inward rail displacement. The inward rail displacements are increased with an decrease in R , an increase in Δt and an increase in L .

図 9(a)に施工延長 30 m におけるレール内方変位の最大値と曲線半径の関係を、図 9(b)にレール内方変位の最大値と温度低下量の関係を示す。また、図 9(c)に曲線半径 400 m におけるレール内方変位の最大値と施工延長の関係を示す。さらに、付録の表 C に全解析ケースにおけるレール内方変位の最大値を示す。図 9 と表 C より、レール内方変位は、曲線半径の減少、温度低下量の増加および施工延長の増加に伴い大きくなることがわかる。また、レール内方変位は、温度低下量の増加に対しては増加率が一定になる傾向を示す一方で、曲線半径の減少と施工延長の増加に対しては、増加率が大きくなる傾向を示している。

2・3・4 レール内方変位に起因した通り変位

レール内方変位によりレール形状が変化した場合、当該変位に起因して通り変位 (Alignment defect) が生じることが考えられる。通り変位とは、レールの長手方向と直角する方向の水平変位であり、軌道変位の管理指標の一つである。一般的に、通り変位は、10 m 弦正矢量 (10 m 離れた 2 点間に張った弦の中央とレールとの距離) として管理されている。なお、曲線区間における通り変位は、図 10 に示すように弦とレールとの距離から円曲線が有する正矢量を減じた値となる。図 11 に曲線半径 400 m、施工延長 30 m、温度低下量 10 °C~50 °C におけるレール内方変位後のレール形状を示す。施工範囲のレール形状は、温度低下量の増加に伴い直線形状に近づくことがわかる。つぎに、次式を用いてレール内方変位に起因した 10 m 弦通り変位を算定した。

$$v_{10m}(\theta) = \frac{v(\theta-5) + v(\theta+5)}{2} - v(\theta) \quad (2)$$

ここに、 $v_{10m}(\theta)$: θ 座標位置の 10 m 弦通り変位であり、一般的に定義されるように、曲線外方への変位を正、内方への変位を負としている。また、 $v(\theta)$ は FEM 解析で得られたレール内方変位である。なお、式(2)を適用し

Fig.10 Alignment defects at curved section. Alignment defects are measured by the 10 m chord versine method and are defined as the differences between the rail and the center of the 10 m chord by taking the curve versine into consideration.

Fig.11 Rail shapes after deformation due to inward rail displacements ($R=400$ m, $L=30$ m, $\Delta t=10-50$ °C). Rail shape of ballast renewal area tends to be a straight.

Fig.12 Alignment defects due to inward rail displacements ($R=400$ m, $L=30$ m, $\Delta t=10-50$ °C). The defects are generated at a center and both ends of ballast renewal area.

(a) Effects of R ($L=30$ m)

(b) Effects of Δt ($L=30$ m)

(c) Effects of L ($R=400$ m)

Fig.13 Effects of radius of curvatures R , decrease in rail temperature Δt and length of ballast renewal work L on the maximum alignment defects. The alignment defects are increased with an decrease in R and an increase in L , and are not necessarily increased with an increase in Δt .

た場合、弦長の 10 m は円弧に沿った長さとなり、円弧の両端を結ぶ直線距離は厳密に 10 m ではない。ただし、円弧長 10 m に対する両端の直線距離は、曲線半径 400 m の場合でも 9.9997 m となるため、精度上の問題はない。

図 12 に曲線半径 400 m、施工延長 30 m、温度低下量 10 °C～50 °C におけるレール内方変位による通り変位を示す。通り変位は、初期形状からの曲率の変化が大きい箇所で生じており、施工範囲の中央部で曲線内方 (－) へ、施工範囲の端部で曲線外方 (+) に生じていることが分かる。図 13(a) に施工延長 30 m における通り変位の最大値と曲線半径の関係を、図 13(b) に通り変位の最大値と温度低下量の関係を示す。また、図 13(c) に曲線半径 400 m における通り変位の最大値と施工延長の関係を示す。さらに、付録の表 D に全解析ケースにおける通り変位の最大値を示す。なお、通り変位の最大値は、曲線内方、外方で生じた変位の絶対値の最大値とした。図 13 と表 D より、通り変位は、曲線半径の減少および施工延長の増加に伴い大きくなることがわかる。また、通り変位は、温度低下量の増加に伴い大きくなる傾向を示すものの、一部のケースにおいて、温度低下量の増加に伴い小さくなる場合があることを確認した。

2・4 道床交換作業前の初期通り変位が及ぼす影響の解析

ここでは、施工範囲にある道床交換作業前の初期通り変位が解析結果に及ぼす影響を把握するため、営業線で実測した 10 m 弦通り変位を図 4 の解析モデルに導入し、温度変化を与える FEM 解析を行った。解析モデルの曲線半径は 400 m とし、施工延長は 10 m と 20 m、温度低下量は 10 °C～40 °C で与えた。

解析モデルに導入した 10 m 弦の初期通り変位は、図 14 に示す 2 通り (ケース 1, 2) とした。当該変位は、営業線の曲線区間で軌道検測車により測定したものであり、ケース 1 で最大 4 mm 程度、ケース 2 で最大 6 mm 程度である。ここで、図 14 の通り変位波形は、10 m 弦正矢量であるため、本波形をデジタル逆フィルタ手法 (吉村, 1987) により 10 m 弦による変換前の推定波形 (復元波形) に変換し、得られた変位波形を図 4 の両レールの座標の r 軸方向に加算した。本解析では、初期通り変位がない場合も設定し、上記の 2 ケースと比較した。

図 15 に各ケースで得られたレール軸力の変化量の最大値を示す。初期通り変位を有するケース 1, 2 と初期通

Fig.14 Initial alignment defects of rails. The defects are measured by the track inspection car at commercial lines.

Fig.15 Maximum change in axial rail force. The differences between case1, case2 and the case without initial defect are 2.3 kN or less and are negligibly small.

Fig.16 Maximum inward rail displacements. The differences between case1, case2 and the case without initial defect are 2.8 mm or less.

Fig.17 Maximum alignment defects. The differences between case1, case2 and the case without initial defect are 3.3 mm or less.

Fig.18 Distribution of alignment defects. The differences of alignment defects between the case with initial defects and the case without initial defects tend to be decreased with the increase in Δt . This is because the initial defects at work area are decreased by the tensile rail axial force.

り変位がない場合のレール軸力の変化量の差は、最大で 2.3 kN であり、換算付加温度で 0.15 °C 程度と小さい結果であった。図 16 に各ケースのレール内方変位の最大値を示す。ケース 1, 2 と初期通り変位がない場合のレール内方変位の差は、最大で 2.8 mm であり、温度低下量の増加とともに差が大きくなる傾向を示した。ただし、初期通り変位の有無によるレール内方変位の差は、レール内方変位と比較して十分に小さいことがわかる。図 17 にレール内方変位に起因した 10 m 弦通り変位の最大値を示す。また、図 18 に 10 m 弦通り変位の分布を示す。ケース 1, 2 と初期通り変位がない場合の通り変位の差は、最大で 3.3 mm であり、温度低下量の増加とともに差が小さくなる傾向を示した。また、上記の差は、いずれも初期通り変位の最大値よりも小さい値であった。この原因は、作業範囲のレールがレール長手方向に引張られることで、初期通り変位が小さくなる方向に変化したためである。

以上を整理すると、初期通り変位が道床交換後のレール軸力の変化とレール内方変位の最大値に及ぼす影響は小さく、また、初期通り変位は、道床交換後においてその最大値が小さくなることがわかる。

3. 低温時作業制限の提案

本章では、前章の FEM 解析の整理結果に基づき、低温時の道床交換作業制限について検討した。

3・1 作業制限の考え方の整理

現行の作業制限では、1 章に示したように、レール内方変位の発生を防止するという観点から許容温度低下量を決定している。一方で、軌きょうの支持が一時的に失われる道床交換時には、過去の現地測定（玉川他, 2019）（玉川他, 2020）および前章の解析に示したようにレール内方変位は不可避免的に発生し、これに伴いレール軸力に変化が生じる。このため、道床交換の作業制限は、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。以下では、FEM 解析結果に基づき、レール軸力とレール内方変位に関する制限を検討した。

3・1・1 レール軸力の制限について

低温時作業に伴う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、2.3.2 項に示したように、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ている。このため、鉄道事業者の運用を念頭に置いた場合、本作業制限におけるレール軸力の変化を表す指標には、付録の表 B に整理した換算付加温度を用いるのが妥当である。

式(3)にロングレールの設定替や道床整備の判断に用いる安全度判定式（保線工学編集委員会, 2016）を示す。

$$S = 1.2 \cdot i^{0.521} \cdot \frac{1}{1 + t_c / \Delta t_{\max}} \quad (3)$$

ここに、 i ：道床横抵抗力比、 t_c (°C)：換算付加温度、 $\Delta t_{\max}$ (°C)：所定のレール温度上昇幅であり、安全度 S が 1.2 を下回った場合について、設定替や道床整備の検討が必要となる。

ロングレール軌道の道床状態が良好な場合を対象として、道床横抵抗力比 i を 1.2 程度、レール温度上昇幅 $\Delta t_{\max}$ を 35 °C として（小俣，2013）（三村，2014）（宮澤，松尾，2020），これらの値を上式に代入して安全度 S を 1.2 とすると、換算付加温度 t_c は 3.5 °C 程度となる。そこで本稿では、換算付加温度について、3.5 °C を作業制限の目安値として整理した。

3・1・2 レール内方変位の制限について

低温時の道床交換作業に伴うレール内方変位の制限は、軌道と架線の離隔確保や、隣接構造物、すなわち、隣接線、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、図 19(a)に示すように、標準的な電気設備の規定において 250 mm 以下となっている（広瀬，溝口，1995）。一方で、曲線区間では、図 19(b)に示すように、トロリ線と軌道中心との変位を最大 200 mm までとって架線を設置してよいものとしている（日本鉄道電気技術協会，2008）。このため、レール内方変位の最大値は、50 mm を目安値とするのが妥当である。一方、その他の隣接構造物の離隔の制限については、施工現場毎に決まるため、付録の表 C から得られるレール内方変位の最大値に基づき、変位後の軌道が隣接構造物に支障しない範囲で施工するべきである。

上記に加えて、レール内方変位に伴う 10 m 弦通り変位が大きい場合、列車の走行安全性や乗り心地の悪化に及ぼす影響が懸念される（古川，2005）。このため、道床交換後の通り変位が引継検査時の仕上がり基準値 4 mm（施工当夜：最大値 7 mm）（松浦，2002）に収まるように、付録の表 D に示すレール内方変位に伴う 10 m 弦通り変位の最大値に対して、軌道整備の観点から制限を設ける必要がある。ここで、当該変位の制限値を引継検査時の仕上がり基準値 4 mm とした場合、想定上、道床交換後の通り整正は不要となるものの、低温時の作業制限は厳しいものとなり現実的かつ実用的ではない。ここで、曲線部の通り変位の整正作業において、一般的に作業延長が 30 m 以内でかつ、軌道の移動量が 20 mm 程度以下を小通り直しとし、これよりも作業延長が長く、移動量の大きい場合（大通り直し）と施工方法を区分している（小山内，加賀，1991）。本研究で想定している道床交換の最大施工延長は 30 m であることから、通り変位の制限値を 20 mm 程度とすれば、小通り直しの範囲となり、整正作業の省力化が図れる。ただし、道床交換当日や引継検査前までに通り整正が可能な量は、保守間合や作業人数等により異なるため、一律に制限値を設ける必要はない。そこで本稿では、鉄道事業者が通り整正の量を選択可能にするため、当該変位について、5 mm，10 mm，15 mm，20 mm を作業制限の目安値として整理した。なお、これらの目安値は、道床交換後の通り整正の前に発生し得る値であり、これを整正することが前提となる。

Fig.19 Relationships between overhead contact line and center of rack. The distance d between the overhead contact line and the center of track should be 250 mm or less. On the other hand, the contact wire can be installed 200 mm away from the center of track at the curved section. Therefore the restriction of the maximum inward rail displacements is about 50 mm as a standard.

3・2 作業制限の提案

前節の検討に基づき、換算付加温度に対して目安値 3.5°C 、レール内方変位に対して目安値 50 mm 、レール内方変位に伴う 10 m 弦通り変位に対して目安値 5 mm 、 10 mm 、 15 mm 、 20 mm を設けた際の作業制限を整理した。

施工延長 5 m 、 10 m 、 15 m 、 20 m 、 25 m 、 30 m の場合について、付録の表 B の各値が 3.5°C 以下、付録の表 C の各値が 50 mm 以下となり、付録の表 D の各値が 5 mm 以下、 10 mm 以下、 15 mm 以下、 20 mm 以下となる温度低下量の最大値を許容温度低下量とし、曲線半径毎に図化した（以下、「作業制限図、Restriction diagram for work」）。図 20 に作業制限図を示す。図 20 には、参考として表 1 に示した現行の作業制限を併記している。なお、図 20 の各線は、温度低下量を 5°C 間隔で解析した結果を整理したため、 5°C の整数倍の位置で許容温度低下量に変化する折れ線となっている。温度低下量をより小さく区分することで、各線は曲線に近づき精度は向上するものの、図中から許容温度低下量の読み取りが困難となり、実用上の問題が生じる。そこで、鉄道事業者の運用を念頭に置き、実用上で必要な精度を確保したうえで、許容温度低下量の読み取りが可能な作業制限図を作成している。

図 20 より、提案する作業制限図は、曲線半径の減少と施工延長の増加に伴い、許容温度低下量が低下している。また、提案する作業制限図は、施工延長と通り変位の目安値により異なるものの、曲線半径の増加に伴い、現行の作業制限を緩和する傾向を示している。通り変位の目安値を 15 mm 以上とした場合、提案する作業制限は、概ね $(20 < L \leq 25\text{ m}, R < 1200\text{ m})$ の場合を除く、現行の作業制限を緩和したものとなっている。この場合の緩和量（両作業制限の許容温度低下量の差）は、施工延長 $L \leq 5\text{ m}$ で最大 10°C 、 $5\text{ m} < L \leq 25\text{ m}$ で最大 40°C 、 $25\text{ m} < L \leq 30\text{ m}$ で最大 50°C となっている。

図 21 に作業制限図を適用する際の評価フローを提案する。提案する作業制限では、施工計画（曲線半径 R 、施工延長 L 、設定温度からの予想温度低下量 Δt_{min} ）が決まると、まず、施工範囲の隣接構造物の有無を確認する。隣接構造物がある場合は、付録の表 C よりレール内方変位の最大値を参照し、変位後の軌道が隣接構造物に支障しないことを確認する。問題がなければ、施工現場の状況に応じて、整正可能な範囲の通り変位の制限目安値 v を選択し、対応する作業制限図を適用する。作業日に予想される設定温度からの温度低下量 Δt_{min} が、作業制限図の線の内側にあれば、許容温度低下量 Δt_a 以下となり、作業が可能であると判断できる。作業後は、付録の表 B

Fig.20 Proposal of the restriction diagrams for ballast renewal work. Allowable decrease in rail temperatures from the neutral temperatures of rail newly welded Δt_a are provided with respect to the radius of curvatures R and the length of ballast renewal work L . This diagrams consider the restriction of converted temperature as 3.5°C , inward rail displacement as 50 mm and alignment defects as 5 to 20 mm .

Fig.21 Proposal of the flow for users to judge propriety of ballast renewal work at a low temperature. At first, users decide the work plan. Secondary, users check the effects of the work on the adjacent structures by use of the maximum inward rail displacements. Thirdly, users select the recommended values of alignment defects and apply the restriction diagrams proposed in Fig.20. If the expected decrease in rail temperature $\Delta t_{\min}$ is less than or equal to the allowable decrease in rail temperature Δt_a , the work plan is acceptable. After the work, users record the converted temperature.

Fig. 22 The conditions of the ballast renewal work performed in the past are plotted in the restriction diagrams ($5 \text{ m} < L \leq 10 \text{ m}$).

Fig. 23 Alignment defects after the ballast renewal work and the re-alignment work. The alignment defects at ballast renewal area are all within the standard values after track maintenance work 4 mm.

に示す換算付加温度を記録することで、式(3)に示した夏季に向けて行うロングレールの安全度判定時に使用する。

ここで、2.2.1 項に示した過去の現地測定時の道床交換作業の施工条件 ($R=400 \text{ m}$, $L=8 \text{ m}$) において、温度低下量 $\Delta t_{\min}$ を表 5 に示した中立温度からの低下量 (1 日目: 6.3°C , 9.1°C , 11.9°C , 2 日目: 9.3°C , 10.0°C , 10.7°C) として作業制限図上にプロットした結果を図 22 に示す。なお、温度低下量を設定温度からではなく、中立温度からの低下量としたのは、提案した作業制限をより適切に評価するためである。図 22 より、本作業の温度低下量は、現行の制限を上回っているものの、提案した作業制限内 ($v \leq 15^\circ\text{C} \sim 20^\circ\text{C}$) に収まっていることがわかる。本作業後の軌道状態の結果として、図 23 に道床交換 1 日目と 2 日目の作業後に実施した通り整正後の 10 m 弦通り変位の実測値を示す。通り整正後の 10 m 弦通り変位は、いずれも仕上がり基準値 4 mm (施工当夜: 最大値 7 mm) (松浦, 2002) 以内に収まっており、施工上の問題がないことがわかる。また、当該現場について、道床交換後の初の夏季を迎えるにあたり実施した、レールのふく進検査に基づくロングレールの座屈に対する安全度判定で

は、安全度が 1.52 となり、設定替や道床整備は不要（安全度 1.2 以上）であった。当該現場は、酷暑期においても、座屈や顕著なレールのふく進などの事象は生じていない。以上の結果は、提案した制限内の作業であれば、現行の作業制限を超過した作業でも、施工後の軌道状態に問題が無いことを裏付けるものである。ただし、現行の作業制限を超過した施工事例が少ないため、今後さらに施工実績を増やしていくことが望ましい。

なお、本稿では、換算付加温度とレール内方変位およびレール内方変位に伴う通り変位に対して一定の目安値を設けた際の作業制限を提案した。一方で、当初から設定替や道床整備を前提とした施工を行う場合は、前述の目安値 3.5℃を超過した施工が可能となる。また、換算付加温度の目安値を 3.5℃より厳しく設定（例えば 0.5～1.0℃）することで、図 21 に示す換算付加温度の記録を省略することも考えられる。さらに、レール内方変位に伴う通り変位の目安値をより詳細に区分することで、施工時の判断材料にすることも可能となる。このように、本作業制限を適用する際には、鉄道事業者側の状況に応じて、換算付加温度やレール内方変位、通り変位の目安値を任意に設定することも可能である。

4. 結 言

本研究では、道床交換作業を想定した一連の FEM 解析を行い、曲線半径と施工延長、温度低下量がレール軸力の変化とレール内方変位に及ぼす影響を把握することで、新しい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) レール軸力の変化量とこれを温度変化量に換算した換算付加温度は、曲線半径の減少、温度低下量の増加および施工延長の増加に伴い大きくなることを確認した。
- (2) レール内方変位は、曲線半径の減少、温度低下量の増加および施工延長の増加に伴い大きくなることを確認した。
- (3) レール内方変位に起因した 10 m 弦通り変位は、曲線半径の減少および施工延長の増加に伴い大きくなることを確認した。また、10 m 弦通り変位は、温度低下量の増加に伴い大きくなる傾向を示すものの、一部のケースにおいて、温度低下量の増加に伴い小さくなる場合があることを確認した。
- (4) 道床交換作業前の初期通り変位が道床交換後のレール軸力の変化とレール内方変位の最大値に及ぼす影響は小さく、また、初期通り変位は、道床交換後においてその最大値が小さくなることを確認した。
- (5) 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 10 m 弦通り変位に制限の目安値を設定し、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。
- (6) 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(5)の作業制限図で算定することで、任意の施工条件（曲線半径、施工延長、設定温度からの温度低下量）に対して低温時作業が可能か否かを判断するための評価フローを提案した。提案した制限内の作業であれば、現行の作業制限を超過した作業でも、通り整正後の 10 m 弦通り変位が仕上がり基準値 4 mm に収まり、酷暑期についても座屈や顕著なレールのふく進などの事象が生じない施工実績を示した。

文 献

- 古川敦, 軌道管理からみた乗り心地向上, RRR, Vol.62, No.12 (2005), pp. 10–13.
- 広瀬秀人, 溝口真, 簡易架線測定器の考案, 新線路, Vol.49, No.6 (1995), pp.48–49.
- 一宮大輔, 道床交換機の施工状況, 新線路, Vol.72, No.9 (2018), pp.17–19.
- 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 (1983), pp.18–22.
- 日本鉄道電気技術協会編, 電車線(2008), pp.20–21.
- 加藤八洲夫, レール・RAIL (1987), pp.171–175, 日本鉄道施設協会.
- 川口昭人, ロングレールの保守作業制限, 新線路, Vol.65, No.7 (2011), pp.34–37.
- 松浦義則, 通り整正作業の施工, 新線路, Vol.56, No.4 (2002), pp. 37–40.
- 三村大輔, JR 東日本における張り出し事故防止に向けた取組み, 新線路, Vol.68, No.2 (2014), pp.6–8.
- 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 (2019), pp.11–16.

- 宮澤秀幸, 松尾圭太郎, JR 東海におけるロングレール・遊間管理, 新線路, Vol.74, No.2 (2020), pp.12–14.
- 小侯貢, JR 北海道の夏季に向けたロングレールの管理, 新線路, Vol.67, No.2 (2013), pp.6–9.
- 小山内正廣, 加賀正良, 曲線整正の勘どころ, 新線路, Vol.45, No.10 (1991), pp.30–33.
- 須田征男, 長門彰, 徳岡研三, 三浦重, 新しい線路 (1997), 日本鉄道施設協会.
- 玉川新悟, 西宮裕騎, 三原輝久, 低温時のロングレールの保守作業に伴うレール軸力の変化とレール内方変位の把握, 第 74 回土木学会年次学術講演会 (2019).
- 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), DOI: 10.1299/transjsme.20-00244.
- 保線工学編集委員会編, 保線工学<上> (2016), p.317–326, 鉄道現業社.
- 吉村彰芳, 軌道狂い原波形の復元に関する理論的基礎の検討とその適用, 土木学会論文集, Vol.377 (1987), pp. 117–126.

References

- Furukawa, A., Improvement of riding comfort from the point of view of track maintenance, RRR, Vol.62, No.12 (2005), pp. 10–13 (in Japanese).
- Hirose, H. and Mizoguchi, M., Design of simple distance measuring instrument of overhead contact line, Shinsenro, Vol.49, No.6 (1995), pp.48–49 (in Japanese).
- Ichinomiya, D., Construction condition of ballast renewal machine, Shinsenro, Vol.72, No.9 (2018), pp.17–19 (in Japanese).
- Ieda, H., Amendment and commentary of restriction of track maintenance for continuous welded rails, Tetsudousenro, Vol.31, No.8 (1983), pp.18–22 (in Japanese).
- Japan railway electrical engineering association, overhead contact line (2008), pp.20–21 (in Japanese).
- Kato, Y., Rail (1987), pp.171–175, Japan Railway Civil Engineering Association (in Japanese).
- Kawaguchi, A., Restriction of track maintenance for continuous welded rails, Shinsenro, Vol.65, No.7 (2011), pp.34–37 (in Japanese).
- Matsuura, Y., Re-alignment of track, Shinsenro, Vol.56, No.4 (2002), pp. 37–40 (in Japanese).
- Mimura, D., Consideration of preventive measures of JR-EAST against track buckling, Shinsenro, Vol.68, No.2 (2014), pp.6–8 (in Japanese).
- Miwa, M., Yamamoto, S., Matsumoto, M., Oshima, T. and Yoshida, T., Modeling a track condition prediction and optimizing mid-term and long-term track maintenance plan, RTRI Report, Vol.33, No.2 (2019), pp.11–16 (in Japanese).
- Miyazawa, H. and Matsuo, K., Track maintenance of continuous welded rails and standard length rails of JR-CENTRAL, Shinsenro, Vol.74, No.2 (2020), pp.12–14 (in Japanese).
- Omata, M., Track maintenance of continuous welded rails for summer season of JR-HOKKAIDO, Shinsenro, Vol.67, No.2 (2013), pp.6–9 (in Japanese).
- Osanai, M. and Kaga, M., The most important point of curve adjusting, Shinsenro, Vol.45, No.10 (1991), pp.30–33 (in Japanese).
- Suda, M., Nagato, A., Tokuoka, K. and Miura, S., Atarashii senro (1997), Japan Railway Civil Engineering Association (in Japanese).
- Tamagawa, S., Nishinomiya, Y. and Mihara, T., Axial force change and displacement of continuous welded rail caused by curved track maintenance at low temperature, Proceedings of the Japan society of civil engineers 74th annual meeting (2019) (in Japanese).
- Tamagawa, S., Nishinomiya, Y., Ota, S. and Nakano, T., Effects of ballast renewal work at low temperature on inward rail displacements and axial rail forces of continuous welded rails on sharp curve, Transactions of the JSME (in Japanese), Vol.86, No.889 (2020), DOI: 10.1299/transjsme.20-00244.
- Track maintenance engineering editing committee, Track maintenance engineering (Part 1) (2016), p.317–326, Tetsudogengyosha (in Japanese).
- Yoshimura, A., Study on theoretical foundations to restoring an original waveform of track irregularity and its application, Journal of Japan Society of Civil Engineering, Vol. 377 (1987), pp. 117–126 (in Japanese).

付 録

Table A Maximum changes in axial rail forces (kN).

$R=400\text{m}$		Δt (°C)									
		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
L (m)	5	0.4	0.7	1.1	1.4	1.9	2.3	2.8	3.3	4.0	4.8
	10	4.2	7.2	9.6	11.7	13.8	16.1	18.7	21.7	25.2	29.4
	15	13.6	21.6	27.4	32.5	37.5	42.9	48.8	55.3	63.0	72.3
	20	27.4	43.4	54.7	64.2	73.2	82.0	91.0	100.7	111.4	123.4
	25	43.6	73.2	93.1	107.5	119.6	131.2	143.0	155.6	169.5	184.7
	30	54.9	97.6	126.3	146.7	162.9	177.8	192.6	208.1	224.7	242.9

$R=1400\text{m}$		Δt (°C)									
		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
L (m)	5	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2
	10	0.4	0.6	0.7	0.8	0.8	0.9	1.0	1.0	1.1	1.1
	15	1.2	1.7	2.0	2.3	2.5	2.6	2.7	2.9	3.0	3.1
	20	2.9	3.9	4.5	4.9	5.2	5.5	5.7	5.9	6.2	6.4
	25	5.7	7.6	8.6	9.3	9.8	10.3	10.7	11.1	11.4	11.8
	30	9.1	12.0	13.5	14.5	15.2	15.9	16.5	17.0	17.6	18.1

$R=500\text{m}$		Δt (°C)									
		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
L (m)	5	0.3	0.5	0.6	0.9	1.1	1.3	1.6	1.8	2.1	2.3
	10	2.8	4.6	6.0	7.1	8.1	9.2	10.4	11.7	13.1	14.7
	15	9.0	13.9	17.1	19.9	22.5	25.1	27.9	31.0	34.4	38.2
	20	19.1	28.9	35.3	40.5	45.3	50.2	55.3	60.9	67.0	73.8
	25	33.3	51.8	63.4	72.6	80.5	87.8	95.1	102.7	110.8	119.7
	30	45.3	74.6	92.6	104.9	114.9	124.1	133.2	142.8	152.8	163.8

$R=1600\text{m}$		Δt (°C)									
		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
L (m)	5	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
	10	0.3	0.5	0.6	0.6	0.7	0.7	0.8	0.8	0.9	0.9
	15	1.0	1.4	1.6	1.8	2.0	2.1	2.2	2.3	2.3	2.4
	20	2.2	3.0	3.4	3.7	4.0	4.2	4.3	4.5	4.6	4.7
	25	4.4	5.8	6.6	7.1	7.5	7.8	8.1	8.4	8.6	8.8
	30	7.1	9.3	10.5	11.2	11.7	12.2	12.6	13.0	13.3	13.7

$R=600\text{m}$		Δt (°C)									
		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
L (m)	5	0.2	0.4	0.5	0.6	0.7	0.9	1.0	1.2	1.3	1.5
	10	2.0	3.1	4.0	4.8	5.4	6.0	6.6	7.3	8.0	8.7
	15	6.3	9.6	11.7	13.4	14.9	16.4	17.9	19.6	21.4	23.3
	20	13.9	20.5	24.5	27.7	30.6	33.4	36.2	39.3	42.5	46.0
	25	25.3	37.4	44.8	50.4	55.3	59.9	64.8	69.9	75.2	80.9
	30	36.5	56.1	67.7	76.3	83.3	89.6	95.7	101.9	108.6	115.5

$R=1800\text{m}$		Δt (°C)									
		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
L (m)	5	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
	10	0.2	0.4	0.4	0.5	0.6	0.6	0.6	0.7	0.7	0.7
	15	0.8	1.1	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.7	1.8	1.9
	20	1.8	2.4	2.8	3.0	3.2	3.4	3.5	3.6	3.7	3.8
	25	3.6	4.7	5.3	5.7	6.0	6.3	6.5	6.7	6.8	7.0
	30	5.8	7.5	8.4	8.9	9.4	9.7	10.0	10.3	10.5	10.8

$R=700\text{m}$		Δt (°C)									
		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
L (m)	5	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
	10	1.4	2.2	2.8	3.3	3.8	4.2	4.5	5.0	5.4	5.8
	15	4.7	7.0	8.5	9.6	10.6	11.5	12.4	13.4	14.4	15.5
	20	10.5	15.1	17.8	20.0	21.8	23.6	25.3	27.2	29.1	31.2
	25	19.7	28.3	33.2	36.9	40.2	43.3	46.3	49.4	52.7	56.3
	30	29.6	43.3	51.1	56.7	61.5	65.9	70.3	74.7	79.2	84.0

$R=2000\text{m}$		Δt (°C)									
		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
L (m)	5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
	10	0.2	0.3	0.3	0.4	0.4	0.4	0.5	0.5	0.5	0.5
	15	0.6	0.9	1.1	1.2	1.3	1.3	1.4	1.5	1.5	1.6
	20	1.5	2.1	2.3	2.5	2.7	2.8	2.9	3.0	3.1	3.1
	25	3.0	3.9	4.4	4.7	4.9	5.1	5.3	5.4	5.6	5.7
	30	4.8	6.2	7.0	7.4	7.8	8.0	8.3	8.5	8.7	8.9

$R=800\text{m}$		Δt (°C)									
		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
L (m)	5	0.1	0.2	0.2	0.3	0.3	0.4	0.5	0.5	0.6	0.7
	10	1.1	1.7	2.2	2.6	2.9	3.1	3.4	3.6	3.9	4.2
	15	3.6	5.3	6.4	7.2	7.9	8.5	9.1	9.7	10.4	11.0
	20	8.1	11.5	13.6	15.0	16.3	17.5	18.7	19.8	21.1	22.4
	25	15.6	22.0	25.5	28.1	30.3	32.4	34.4	36.4	38.6	40.9
	30	24.0	34.0	39.5	43.4	46.7	49.8	52.8	55.8	58.9	62.2

$R=4000\text{m}$		Δt (°C)									
		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
L (m)	5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	10	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
	15	0.2	0.3	0.3	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
	20	0.4	0.6	0.7	0.7	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
	25	0.9	1.1	1.2	1.3	1.4	1.4	1.5	1.5	1.5	1.5
	30	1.4	1.8	2.0	2.2	2.2	2.3	2.4	2.4	2.4	2.5

$R=900\text{m}$		Δt (°C)									
		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
L (m)	5	0.1	0.2	0.2	0.3	0.3	0.4	0.4	0.5	0.5	0.5
	10	0.9	1.3	1.7	2.0	2.2	2.4	2.6	2.8	3.0	3.2
	15	2.9	4.2	5.1	5.7	6.2	6.6	7.1	7.5	8.0	8.4
	20	6.6	9.3	10.8	11.9	12.9	13.7	14.5	15.4	16.2	17.1
	25	12.7	17.5	20.2	22.1	23.6	25.1	26.5	28.0	29.4	30.9
	30	19.7	27.3	31.3	34.2	36.5	38.7	40.9	42.9	45.1	47.3

$R=6000\text{m}$		Δt (°C)									
		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
L (m)	5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0
	15	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
	20	0.2	0.3	0.3	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
	25	0.4	0.6	0.6	0.7	0.7	0.7	0.8	0.8	0.8	0.8
	30	0.7	0.9	1.0	1.1	1.1	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2

$R=1000\text{m}$		Δt (°C)									
		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
L (m)	5	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3	0.3	0.4
	10	0.7	1.1	1.3	1.5	1.7	1.9	2.0	2.2	2.3	2.5
	15	2.4	3.5	4.2	4.6	5.1	5.4	5.7	6.0	6.3	6.6
	20	5.4	7.6	8.8	9.6	10.3	11.0	11.6	12.1	12.7	13.3
	25	10.5	14.5	16.6	18.0	19.2	20.3	21.4	22.3	23.4	24.5
	30	16.5	22.5	25.6	27.9	29.6	31.3	32.8	34.4	35.9	37.5

$R=8000\text{m}$		Δt (°C)									
		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
L (m)	5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	15	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
	20	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
	25	0.3	0.4	0.4	0.4	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
	30	0.5	0.6	0.7	0.7	0.7	0.7	0.8	0.8	0.8	0.8

Table B Maximum converted temperature (°C).

$R=400\text{m}$		$\Delta t \text{ (}^\circ\text{C)}$									
		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
$L \text{ (m)}$	5	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3
	10	0.3	0.5	0.6	0.8	0.9	1.1	1.2	1.4	1.7	1.9
	15	0.9	1.4	1.8	2.2	2.5	2.8	3.2	3.7	4.2	4.8
	20	1.8	2.9	3.6	4.3	4.9	5.4	6.0	6.7	7.4	8.2
	25	2.9	4.9	6.2	7.1	7.9	8.7	9.5	10.3	11.3	12.3
	30	3.6	6.5	8.4	9.7	10.8	11.8	12.8	13.8	14.9	16.1

$R=1400\text{m}$		Δt (°C)									
		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
L (m)	5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	10	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
	15	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
	20	0.2	0.3	0.3	0.3	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
	25	0.4	0.5	0.6	0.6	0.7	0.7	0.7	0.7	0.8	0.8
	30	0.6	0.8	0.9	1.0	1.0	1.1	1.1	1.1	1.2	1.2

$R=500\text{m}$		$\Delta t \text{ (}^{\circ}\text{C)}$									
		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
$L \text{ (m)}$	5	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2
	10	0.2	0.3	0.4	0.5	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
	15	0.6	0.9	1.1	1.3	1.5	1.7	1.9	2.1	2.3	2.5
	20	1.3	1.9	2.3	2.7	3.0	3.3	3.7	4.0	4.4	4.9
	25	2.2	3.4	4.2	4.8	5.3	5.8	6.3	6.8	7.4	7.9
	30	3.0	4.9	6.1	7.0	7.6	8.2	8.8	9.5	10.1	10.9

$R=1600\text{m}$		$\Delta t \text{ (}^{\circ}\text{C)}$									
		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
$L \text{ (m)}$	5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1
	15	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2
	20	0.1	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
	25	0.3	0.4	0.4	0.5	0.5	0.5	0.6	0.6	0.6	0.6
	30	0.5	0.6	0.7	0.7	0.8	0.8	0.8	0.9	0.9	0.9

$R=600\text{m}$		$\Delta t \text{ (}^{\circ}\text{C)}$									
		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
$L \text{ (m)}$	5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
	10	0.1	0.2	0.3	0.3	0.4	0.4	0.4	0.5	0.5	0.6
	15	0.4	0.6	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5
	20	0.9	1.4	1.6	1.8	2.0	2.2	2.4	2.6	2.8	3.1
	25	1.7	2.5	3.0	3.3	3.7	4.0	4.3	4.6	5.0	5.4
	30	2.4	3.7	4.5	5.1	5.5	5.9	6.4	6.8	7.2	7.7

$R=1800\text{m}$		Δt ($^{\circ}\text{C}$)									
		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
L (m)	5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	15	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
	20	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3
	25	0.2	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.5
	30	0.4	0.5	0.6	0.6	0.6	0.6	0.7	0.7	0.7	0.7

$R=700\text{m}$		$\Delta t \text{ (}^{\circ}\text{C)}$									
		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
$L \text{ (m)}$	5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1
	10	0.1	0.1	0.2	0.2	0.3	0.3	0.3	0.3	0.4	0.4
	15	0.3	0.5	0.6	0.6	0.7	0.8	0.8	0.9	1.0	1.0
	20	0.7	1.0	1.2	1.3	1.4	1.6	1.7	1.8	1.9	2.1
	25	1.3	1.9	2.2	2.4	2.7	2.9	3.1	3.3	3.5	3.7
	30	2.0	2.9	3.4	3.8	4.1	4.4	4.7	5.0	5.3	5.6

$R=2000\text{m}$		Δt ($^{\circ}\text{C}$)									
		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
L (m)	5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	15	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
	20	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
	25	0.2	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4
	30	0.3	0.4	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.6	0.6	0.6

$R=800\text{m}$		$\Delta t \text{ (}^{\circ}\text{C)}$									
		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
$L \text{ (m)}$	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

$R=4000\text{m}$		$\Delta t \text{ (}^{\circ}\text{C)}$									
		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
$L \text{ (m)}$	5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	15	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	20	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
	25	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
	30	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2

$R=900\text{m}$		$\Delta t \text{ (}^{\circ}\text{C)}$									
		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
$L \text{ (m)}$	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	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
	15	0.2	0.3	0.3	0.4	0.4	0.4	0.5	0.5	0.5	0.6
	20	0.4	0.6	0.7	0.8	0.9	0.9	1.0	1.0	1.1	1.1
	25	0.8	1.2	1.3	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0	2.1
	30	1.3	1.8	2.1	2.3	2.4	2.6	2.7	2.8	3.0	3.1

[illegible]

$R=1000\text{m}$		$\Delta t \text{ (}^{\circ}\text{C)}$									
		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
$L \text{ (m)}$	5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	10	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2
	15	0.2	0.2	0.3	0.3	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
	20	0.4	0.5	0.6	0.6	0.7	0.7	0.8	0.8	0.8	0.9
	25	0.7	1.0	1.1	1.2	1.3	1.3	1.4	1.5	1.6	1.6
	30	1.1	1.5	1.7	1.9	2.0	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5

$R=8000\text{m}$		$\Delta t \text{ (}^{\circ}\text{C)}$									
		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
$L \text{ (m)}$	5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	15	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	20	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	25	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	30	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1

$R=1200\text{m}$		$\Delta t \text{ (}^{\circ}\text{C)}$									
		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
$L \text{ (m)}$	5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	10	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
	15	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3	0.3	0.3
	20	0.3	0.4	0.4	0.4	0.5	0.5	0.5	0.5	0.6	0.6
	25	0.5	0.7	0.8	0.8	0.9	0.9	1.0	1.0	1.0	1.1
	30	0.8	1.1	1.2	1.3	1.4	1.4	1.5	1.5	1.6	1.7

Table C Maximum inward rail displacements (mm).

$R=400\text{m}$		$\Delta t\ (^{\circ}\text{C})$									
		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
$L\ (\text{m})$	5	1.5	2.6	3.9	5.2	6.6	7.9	9.2	10.5	12.0	13.7
	10	10.1	17.9	24.0	29.1	33.8	38.4	43.1	47.8	52.8	58.2
	15	25.6	42.6	55.0	65.1	74.0	82.5	90.7	99.1	107.8	117.4
	20	43.4	73.1	94.3	111.0	125.2	138.1	150.6	163.4	176.6	190.7
	25	59.1	106.5	141.8	169.1	191.5	211.3	229.9	248.3	267.0	286.2
	30	66.2	128.1	181.1	222.5	255.1	282.8	307.9	331.9	355.3	379.1

$R=1400\text{m}$		$\Delta t\ (^{\circ}\text{C})$									
		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
$L\ (\text{m})$	5	0.4	0.7	0.9	1.1	1.3	1.4	1.6	1.8	1.9	2.1
	10	2.9	4.7	5.9	6.8	7.6	8.2	8.9	9.5	10.0	10.4
	15	7.9	11.7	14.2	16.2	17.7	18.9	19.9	20.8	21.7	22.4
	20	15.4	22.1	26.5	29.5	31.7	33.6	35.1	36.4	37.7	38.9
	25	26.8	38.1	44.6	49.0	52.2	54.8	57.1	59.1	60.9	62.7
	30	38.9	55.1	64.0	69.8	74.1	77.8	80.8	83.4	86.0	88.3

$R=500\text{m}$		$\Delta t\ (^{\circ}\text{C})$									
		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
$L\ (\text{m})$	5	1.2	2.1	3.0	3.9	4.9	5.8	6.8	7.6	8.4	9.3
	10	8.2	14.1	18.7	22.3	25.5	28.5	31.5	34.4	37.3	40.5
	15	21.1	34.4	43.4	50.7	56.9	62.5	68.1	73.5	78.9	84.5
	20	38.3	61.4	77.0	88.8	98.7	107.7	116.2	124.5	132.9	141.6
	25	57.2	95.6	121.1	140.2	155.6	169.0	181.6	193.9	206.2	219.0
	30	69.6	124.1	162.6	190.6	212.6	231.5	248.7	265.4	281.7	298.3

$R=1600\text{m}$		$\Delta t\ (^{\circ}\text{C})$									
		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
$L\ (\text{m})$	5	0.3	0.6	0.8	1.0	1.2	1.3	1.4	1.6	1.7	1.9
	10	2.6	4.2	5.3	6.1	6.8	7.3	7.8	8.3	8.7	9.2
	15	7.0	10.5	12.6	14.2	15.5	16.6	17.4	18.2	18.9	19.5
	20	13.6	19.4	23.1	25.6	27.5	29.0	30.4	31.5	32.4	33.4
	25	23.5	33.1	38.6	42.4	45.2	47.4	49.2	50.9	52.4	53.8
	30	34.5	48.2	55.8	60.8	64.4	67.3	69.9	72.1	74.0	75.9

$R=600\text{m}$		$\Delta t\ (^{\circ}\text{C})$									
		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
$L\ (\text{m})$	5	1.0	1.8	2.5	3.1	3.8	4.5	5.2	5.9	6.5	7.1
	10	6.9	11.6	15.2	18.2	20.6	22.7	24.8	26.8	28.8	30.7
	15	17.8	28.6	35.8	41.2	45.9	50.0	53.9	57.8	61.5	65.3
	20	33.5	52.3	64.2	73.2	80.8	87.3	93.4	99.3	105.1	110.9
	25	52.9	83.9	103.5	117.8	129.2	139.1	148.3	157.1	165.6	174.4
	30	68.4	113.8	142.7	163.3	179.5	193.1	205.6	217.4	229.1	240.8

$R=1800\text{m}$		$\Delta t\ (^{\circ}\text{C})$									
		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
$L\ (\text{m})$	5	0.3	0.6	0.8	1.0	1.1	1.3	1.4	1.5	1.6	1.8
	10	2.3	3.8	4.7	5.4	6.0	6.5	6.9	7.2	7.6	7.9
	15	6.2	9.2	11.0	12.4	13.5	14.4	15.1	15.8	16.4	16.9
	20	12.1	17.3	20.4	22.7	24.4	25.7	26.8	27.8	28.7	29.4
	25	21.1	29.4	34.3	37.6	40.0	41.9	43.5	44.9	46.1	47.3
	30	31.0	42.9	49.5	53.8	57.0	59.5	61.5	63.4	65.1	66.6

$R=700\text{m}$		$\Delta t\ (^{\circ}\text{C})$									
		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
$L\ (\text{m})$	5	0.8	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.1	4.6	5.1	5.6
	10	5.8	9.5	12.6	15.0	17.1	18.8	20.3	21.9	23.3	24.8
	15	15.4	24.4	30.3	34.7	38.3	41.5	44.4	47.2	50.0	52.7
	20	29.3	44.9	54.6	61.9	67.6	72.8	77.4	81.9	86.3	90.5
	25	48.0	73.8	89.5	100.6	109.7	117.5	124.5	131.1	137.5	143.9
	30	64.7	102.5	125.4	141.4	153.9	164.4	173.9	182.8	191.4	200.1

$R=2000\text{m}$		$\Delta t\ (^{\circ}\text{C})$									
		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
$L\ (\text{m})$	5	0.2	0.4	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.0	1.1	1.2
	10	2.0	3.3	4.1	4.7	5.2	5.6	6.0	6.3	6.6	6.8
	15	5.5	8.3	9.9	11.1	12.0	12.8	13.6	14.2	14.7	15.2
	20	11.0	15.7	18.4	20.4	21.9	23.1	24.0	24.8	25.6	26.3
	25	19.0	26.2	30.6	33.4	35.6	37.3	38.7	39.9	40.9	41.9
	30	28.0	38.5	44.4	48.3	51.1	53.3	55.1	56.6	58.1	59.5

$R=800\text{m}$		$\Delta t\ (^{\circ}\text{C})$									
		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
$L\ (\text{m})$	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

$R=4000\text{m}$		$\Delta t\ (^{\circ}\text{C})$									
		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
$L\ (\text{m})$	5	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3	0.3	0.3
	10	1.0	1.5	1.9	2.2	2.4	2.6	2.7	2.8	3.0	3.1
	15	2.7	4.0	4.8	5.4	5.8	6.1	6.3	6.6	6.8	7.0
	20	5.5	7.8	9.1	9.9	10.5	11.0	11.5	11.8	12.1	12.4
	25	9.5	13.0	14.9	16.1	17.0	17.7	18.3	18.8	19.3	19.7
	30	14.3	19.2	21.8	23.5	24.7	25.7	26.5	27.2	27.8	28.3

$R=900\text{m}$		$\Delta t\ (^{\circ}\text{C})$									
		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
$L\ (\text{m})$	5	0.7	1.2	1.6	2.0	2.4	2.7	3.0	3.4	3.7	4.1
	10	4.6	7.5	9.6	11.4	12.8	14.1	15.2	16.2	17.1	18.0
	15	12.2	18.8	23.3	26.5	29.1	31.1	33.1	34.9	36.6	38.3
	20	23.4	35.2	42.4	47.4	51.4	54.8	57.8	60.7	63.3	66.0
	25	39.6	58.6	69.7	77.5	83.5	88.7	93.3	97.6	101.6	105.6
	30	55.8	83.4	99.1	109.9	118.3	125.4	131.7	137.4	142.8	148.0

$R=6000\text{m}$		$\Delta t\ (^{\circ}\text{C})$									
		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
$L\ (\text{m})$	5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
	10	0.6	1.0	1.2	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	1.9
	15	1.8	2.6	3.1	3.5	3.8	4.0	4.1	4.3	4.4	4.5
	20	3.5	4.9	5.8	6.3	6.7	7.0	7.2	7.5	7.7	7.8
	25	6.4	8.7	9.9	10.7	11.3	11.7	12.1	12.4	12.7	12.9
	30	9.5	12.8	14.5	15.6	16.3	16.9	17.4	17.8	18.2	18.5

$R=1000\text{m}$		$\Delta t\ (^{\circ}\text{C})$									
		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
$L\ (\text{m})$	5	0.6	1.0	1.4	1.7	1.9	2.2	2.5	2.8	3.0	3.3
	10	4.1	6.7	8.5	10.0	11.3	12.3	13.3	14.2	15.0	15.7
	15	11.0	16.8	20.8	23.6	25.9	27.8	29.4	30.9	32.3	33.7
	20	21.4	31.8	38.1	42.5	45.9	48.8	51.4	53.7	55.9	58.1
	25	36.2	53.0	62.7	69.4	74.7	78.9	82.8	86.3	89.7	92.9
	30	51.7	75.8	89.3	98.8	105.8	111.9	117.0	121.9	126.3	130.7

Table D Maximum alignment defects (mm).

$R=400\text{m}$		Δt (°C)									
		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
L (m)	5	1.5	2.7	4.0	5.3	6.7	7.9	9.0	10.1	11.1	12.2
	10	8.4	14.1	17.9	20.7	22.7	24.2	25.4	26.3	27.0	27.5
	15	12.7	19.3	23.0	25.2	26.5	27.5	28.1	28.6	28.9	29.2
	20	13.4	20.6	25.8	29.5	31.6	33.1	33.9	33.8	33.2	31.9
	25	13.7	24.5	32.3	37.3	40.4	42.4	43.1	42.7	41.6	39.7
	30	13.0	25.4	35.5	42.5	47.2	49.8	50.9	50.5	49.3	47.0

$R=1400\text{m}$		Δt (°C)									
		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
L (m)	5	0.4	0.7	1.0	1.2	1.4	1.5	1.7	1.9	2.0	2.2
	10	2.5	3.9	4.8	5.5	6.0	6.4	6.7	7.0	7.2	7.4
	15	4.0	5.7	6.6	7.1	7.5	7.7	7.9	8.0	8.1	8.2
	20	4.7	6.6	7.9	8.8	9.3	9.7	10.1	10.4	10.6	10.7
	25	6.4	9.3	10.9	12.0	12.7	13.2	13.6	13.9	14.1	14.2
	30	8.0	11.6	13.5	14.8	15.6	16.2	16.6	17.0	17.1	17.2

$R=500\text{m}$		Δt (°C)									
		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
L (m)	5	1.2	2.2	3.1	4.0	5.0	5.9	6.7	7.5	8.2	8.8
	10	6.9	11.3	14.3	16.4	17.9	19.1	20.0	20.8	21.4	21.9
	15	10.6	15.8	18.6	20.3	21.3	22.0	22.5	22.9	23.2	23.4
	20	11.8	17.5	21.4	24.1	25.9	27.0	27.7	28.1	27.9	27.6
	25	13.4	22.3	28.0	31.5	33.7	35.2	35.6	35.9	35.2	34.2
	30	13.8	24.8	32.3	36.9	40.0	41.7	42.3	42.3	41.4	39.8

$R=1600\text{m}$		Δt (°C)									
		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
L (m)	5	0.4	0.6	0.9	1.1	1.3	1.4	1.5	1.7	1.8	2.0
	10	2.2	3.5	4.3	4.9	5.4	5.7	6.0	6.2	6.4	6.6
	15	3.5	5.1	5.9	6.4	6.7	6.9	7.1	7.2	7.3	7.3
	20	4.2	5.8	6.8	7.6	8.1	8.4	8.7	8.9	9.1	9.3
	25	5.7	8.1	9.5	10.4	11.1	11.5	11.8	12.1	12.3	12.4
	30	7.1	10.2	11.9	13.0	13.7	14.3	14.6	14.9	15.2	15.3

$R=600\text{m}$		Δt (°C)									
		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
L (m)	5	1.0	1.8	2.5	3.2	3.9	4.6	5.2	5.8	6.4	6.9
	10	5.8	9.3	11.8	13.5	14.8	15.8	16.5	17.1	17.6	18.0
	15	9.0	13.3	15.6	16.9	17.8	18.4	18.8	19.1	19.3	19.5
	20	10.3	15.0	18.2	20.3	21.8	22.7	23.4	23.8	24.0	24.0
	25	12.4	19.7	24.1	26.8	28.6	29.7	30.5	30.6	30.6	30.1
	30	13.6	22.9	28.7	32.1	34.5	35.7	36.3	36.5	36.0	35.3

$R=1800\text{m}$		Δt (°C)									
		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
L (m)	5	0.3	0.6	0.8	1.0	1.2	1.3	1.4	1.6	1.7	1.8
	10	2.0	3.1	3.8	4.3	4.7	5.0	5.2	5.4	5.6	5.7
	15	3.1	4.5	5.2	5.6	5.9	6.1	6.2	6.3	6.4	6.4
	20	3.7	5.1	6.1	6.7	7.2	7.5	7.8	8.0	8.2	8.4
	25	5.1	7.2	8.4	9.3	9.8	10.2	10.5	10.7	10.9	11.0
	30	6.4	9.1	10.5	11.5	12.2	12.6	12.9	13.1	13.3	13.5

$R=700\text{m}$		Δt (°C)									
		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
L (m)	5	0.8	1.5	2.1	2.6	3.1	3.6	4.1	4.6	5.1	5.5
	10	4.9	7.8	9.9	11.4	12.4	13.2	13.8	14.4	14.8	15.1
	15	7.7	11.3	13.2	14.4	15.1	15.6	15.9	16.1	16.3	16.5
	20	9.0	13.0	15.7	17.4	18.6	19.5	20.0	20.4	20.6	20.8
	25	11.4	17.4	21.1	23.3	24.9	25.8	26.6	26.9	26.9	26.8
	30	13.0	20.9	25.5	28.3	30.2	31.2	31.9	32.0	32.0	31.4

$R=2000\text{m}$		Δt (°C)									
		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
L (m)	5	0.2	0.4	0.6	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.2	1.4
	10	1.7	2.7	3.4	3.8	4.1	4.4	4.6	4.8	4.9	5.0
	15	2.8	4.0	4.6	4.9	5.2	5.4	5.5	5.6	5.6	5.7
	20	3.3	4.7	5.6	6.2	6.7	7.0	7.2	7.4	7.5	7.7
	25	4.6	6.5	7.6	8.4	8.9	9.2	9.5	9.7	9.8	10.0
	30	5.8	8.3	9.6	10.4	11.1	11.5	11.8	12.0	12.2	12.4

$R=800\text{m}$		Δt (°C)									
		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
L (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

$R=4000\text{m}$		Δt (°C)									
		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
L (m)	5	0.1	0.1	0.2	0.2	0.3	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4
	10	0.8	1.2	1.5	1.7	1.9	2.0	2.1	2.2	2.2	2.3
	15	1.3	1.9	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.6	2.7	2.7
	20	1.7	2.4	2.8	3.1	3.3	3.5	3.6	3.7	3.8	3.8
	25	2.3	3.2	3.7	4.0	4.3	4.5	4.6	4.7	4.8	4.9
	30	3.0	4.2	4.8	5.2	5.5	5.7	5.9	6.1	6.2	6.2

$R=900\text{m}$		Δt (°C)									
		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
L (m)	5	0.7	1.2	1.7	2.1	2.4	2.8	3.1	3.4	3.8	4.1
	10	3.9	6.1	7.7	8.8	9.7	10.3	10.8	11.2	11.5	11.7
	15	6.2	8.9	10.4	11.3	11.8	12.2	12.5	12.7	12.8	13.0
	20	7.3	10.3	12.3	13.6	14.5	15.3	15.8	16.1	16.4	16.5
	25	9.4	14.0	16.7	18.4	19.4	20.3	20.8	21.1	21.4	21.4
	30	11.3	17.1	20.4	22.5	23.8	24.7	25.2	25.6	25.6	25.5

$R=6000\text{m}$		Δt (°C)									
		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
L (m)	5	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2
	10	0.5	0.8	1.0	1.1	1.2	1.2	1.3	1.3	1.4	1.4
	15	0.9	1.2	1.4	1.5	1.6	1.6	1.7	1.7	1.7	1.8
	20	1.0	1.5	1.8	1.9	2.1	2.2	2.2	2.3	2.3	2.4
	25	1.6	2.2	2.5	2.7	2.9	3.0	3.1	3.2	3.3	3.3
	30	2.0	2.8	3.2	3.5	3.6	3.8	3.9	4.0	4.1	4.1

$R=1000\text{m}$		Δt (°C)									
		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
L (m)	5	0.6	1.0	1.4	1.7	2.0	2.3	2.6	2.9	3.1	3.4
	10	3.5	5.5	6.8	7.8	8.6	9.1	9.6	9.9	10.2	10.4
	15	5.5	8.0	9.3	10.1	10.6	10.9	11.1	11.3	11.5	11.6
	20	6.6	9.3	11.2	12.4	13.1	13.8	14.3	14.6	14.7	15.0
	25	8.7	12.8	15.2	16.7	17.7	18.4	18.9	19.2	19.4	19.5
	30	10.5	15.7	18.6	20.4	21.5	22.5	23.0	23.2	23.5	23.4

R=8000m		Δt (°C)									
		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
L (m)	5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
	10	0.3	0.6	0.7	0.8	0.8	0.9	0.9	1.0	1.0	1.0
	15	0.6	0.9	1.0	1.1	1.1	1.2	1.2	1.3	1.3	1.3
	20	0.8	1.2	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.8	1.9	1.9
	25	1.2	1.6	1.9	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.5	2.5
	30	1.5	2.1	2.4	2.6	2.7	2.8	2.9	3.0	3.1	3.1