

履歴をもつ非線形道床縦抵抗力による ロングレール軌道の伸縮特性

THERMAL RESPONSE OF LONG WELDED RAIL WITH LONGITUDINAL
RESISTANCE HAVING HYSTERESIS AND NON-LINEARITY

伊能忠敏*・鈴木俊一**・佐藤吉彦***

By Tadatoshi INO, Shun-ichi SUZUKI and Yoshihiko SATO

This paper presents a new analysis of long welded rail. It is essential to grasp the behavior of long welded rail precisely for the wider application and for the installation of very long one. The model employed has the hysteresis and non-linearity in the longitudinal rail displacement and the ballast resistance. The results obtained through the model agreed well with data in operating line. The length of moving section of long welded rail was revealed to be longer than that of existing model, in the long term history of rail temperature.

Keywords : long welded rail, longitudinal ballast resistance, expansion of rail, axial force of rail

1. まえがき

軌道の最大の弱点であるレール継目を溶接により取り除きロングレールとすることは、高速鉄道にとって不可欠の条件である。このロングレール成立の前提として、温度変化に伴うロングレールの長手方向の挙動を把握することが必要であり、この点に関しては過去に多くの理論解析ならびに測定が行われている^{1)~6)}。しかしながら実際のロングレールの挙動は必ずしも理論とは一致せず、ロングレールの伸縮が年単位でみると全長に及ぶ⁷⁾などロングレールの不動区間と考えられる区間においてもレールの変位がみられること、設定替を行なうときのレールの伸縮量が計算値と一致しない場合がみられること、特に厳しい寒さを経た年には軌道の座屈が多く、設定温度の実質的な低下が推定されること等が保線の現場では経験的にいわれている。この理由としては計算を容易にするために道床縦抵抗力を塑性抵抗と仮定し、一定

値としているが実際にはそうでないこととレールの温度履歴を無視していることが挙げられる。

道床縦抵抗力とまくらぎ変位の間には、立花ほかによる測定²⁾あるいはBirmannによる測定⁸⁾の結果から、図-1のようにまくらぎ変位が小さい範囲では道床縦抵抗力が急増し、変位が比較的大きくなると微増傾向を示す関係があり、この近似として図-2(a)~(h)が提案されている。UIC (Union Internationale des Chemins de fer) のORE (Office de Recherches et d'Essais) ではD101「橋梁上における力行制動荷重ならびに軌道と構造物の相互作用」についての委員会が1966年に設けられ、その報告書の中で道床縦抵抗力の近似として(a)および(c)が用いられている⁴⁾。またTeodorescoは(b)~(e)のそれぞれの場合について、ロングレールの伸縮区間長を計算し比較している³⁾。さらに星野によるロン

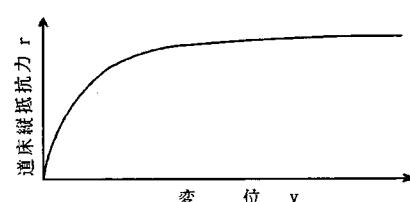


図-1 まくらぎ変位と道床縦抵抗力

* 正会員 工博 金沢工業大学教授 土木工学科
(〒921 石川県石川郡野々市町扇ヶ丘7-1)

** 正会員 JR 東日本施設電気部保線課課長代理 (前・国鉄
鉄道技術研究所軌道研究室)
(〒100 千代田区丸の内1-6-5)

*** 正会員 工博 KK 日本線路技術顧問 (前・国鉄鉄道技
術研究所軌道研究室長)
(〒160 新宿区新宿3-36-10)

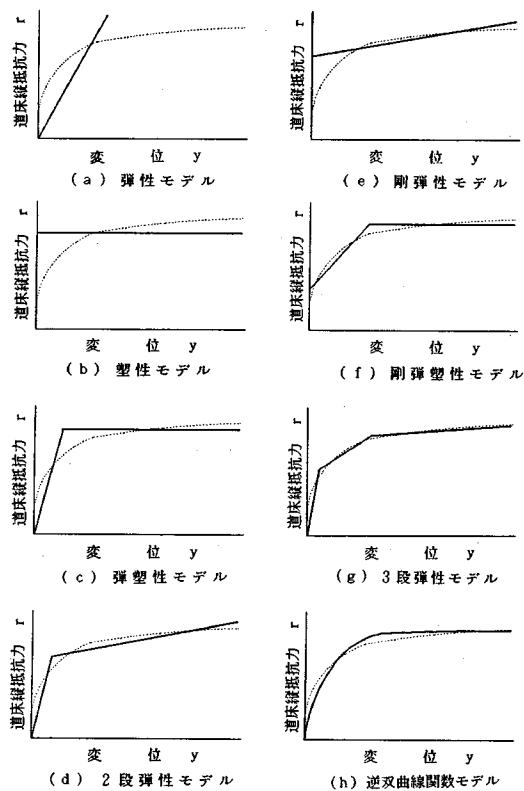


図-2 道床縦抵抗力モデルの例

グレールの伸縮計算¹⁾には(c)が、Kerrの軌道座屈安定性解析⁹⁾には(f)が、Chuほかの力行制動荷重によるレール変位の計算¹⁰⁾には(g)が、Samavedamほかの軌道座屈安定性解析¹¹⁾には(h)がそれぞれ用いられた。また最近では、ロングレールの温度履歴に伴う挙動について、塑性モデルを用いた家田ほかによるシミュレーション¹²⁾が提案されているが、文献7)に紹介されているようなロングレール全般としての伸縮や、設定蓄時の伸縮量に対しては説明されていない。

しかし、今後ロングレールのより適切な管理、敷設範囲の拡大あるいはロングレールの長大化をはかるためには、その温度履歴に伴う挙動について、さらに詳細な検討が必要と考えられた。

ここでは道床縦抵抗力の特性を実験により把握し、得られた非線形特性をもつ道床縦抵抗力とその履歴を考慮したモデルを提案し、これを用いて温度変化に伴うロングレールの挙動のシミュレーションを行い、その結果を実験結果と照合し、モデルの妥当性とともに、これから得られた新たな結果についての考察を進める。

2. 道床縦抵抗力の特性

道床横抵抗力がまくらぎ1~2本を横引きすることで

比較的容易に測定できるのに対しても、道床縦抵抗力の場合には、縦引力の値が大きくなることに加えて、まくらぎ変位量が大きく、隣接したまくらぎの影響が無視できないこと、まくらぎ1本あるいはまくらぎ数本分の軌きようを縦引きした場合には、縦引力と抵抗力の作用線が一致しないことによるモーメントのため、まくらぎあるいは軌きようを持上がりが生じることなどから、道床縦抵抗力の測定例としては前述の立花ほかによる測定²⁾、Birmanによる測定⁸⁾そして鈴木ほかによる測定¹³⁾があるが、測定例は少なく、これらの場合にも変位方向を変えて測定することは行われていない。

そこで鉄道技術研究所構内に設置されている実物軌道座屈実験装置を用いて、道床縦抵抗力を変位方向を変えた場合も含めて測定する手法を考案し、測定を行った。

(1) 測定概要

実物軌道座屈実験装置は図-3に示すようにレールの両端を固定し、これに通電加熱することによりレール軸圧力を付加させ実物軌道の座屈実験を行うための装置であるが、この装置を用いてレール端部を解放したままでレールを加熱すると、レールとまくらぎから成る軌きようは道床縦抵抗力を受けながら端部から変位を生じ、その範囲はしだいに中央部に向けて拡大する。このとき図-4に示すように解放端からまくらぎ6本の供試区間に

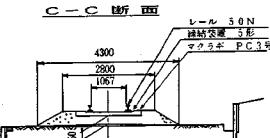
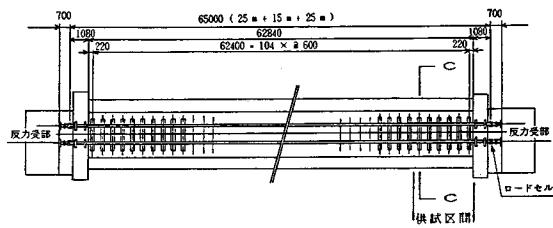


図-3 実物軌道座屈実験装置

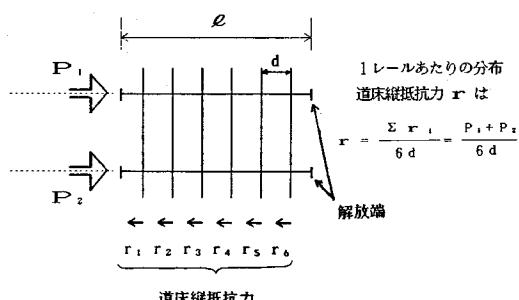


図-4 道床縦抵抗力推定の基本的考え方

表一 供試軌道の線形および構造

項目	内 容
線 形	直 線
勾 配	レ ベ ル
レール	5.0 N
まくらぎ	P C 3号
道 床	碎石厚 250 mm

作用する道床縦抵抗力の合計は、この区間の中央部側の端部に働く2本のレール軸力の合計に等しくなることから、レールの軸方向ひずみおよび軌きょうの変位を測定することにより道床縦抵抗力を求めることとした。また、軌きょうの変位方向を変えるためには、通電を停止し自然冷却させるとともに加熱した部分に撒水を行い、レールを冷却することにより軸引張力を生じさせた。この供試区間の軌道構造を表一に示す。

(2) 測定結果

軌きょうの縦変位と片側レール当たりの道床縦抵抗力の関係を図-5に示す。この結果から、道床縦抵抗力についても道床横抵抗力に関して報告¹⁴⁾されているように変位と抵抗力の関係が式(1)の双曲線でかなりよく近似できることが明らかになった。

$$r = r_0 \cdot y / (y + a) \dots \dots \dots (1)$$

ただし、

r ：道床縦抵抗力 (N/cm)

r_0 ：道床縦抵抗力の漸近値 (N/cm)

y ：変位 (cm)

a ：道床縦抵抗力の初期特性を示す係数

($r = r_0/2$ となるときの変位) (cm)

なお試験軌道においては、 $r_0 = 44.1 \text{ N/cm}$, $a = 0.06 \text{ cm}$ であった。

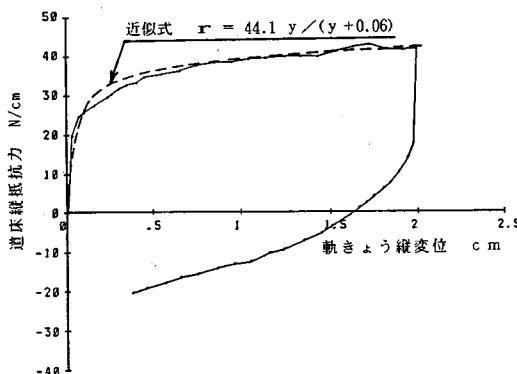


図-5 軌きょう縦変位と道床縦抵抗力

(3) 道床縦抵抗力モデルの設定

実際の軌きょうの変位は、図-5に示されているように方向を変えた変位の繰り返しと考えられることから、式(1)およびこれを原点に対して対称に回転したもの

を基本とし、これらを平行移動し組み合わせることにより、図-6に示すように変位の履歴に応じた道床縦抵抗力モデルを設定した。計算ステップ j における道床縦抵抗力の一般式を式(2)に示す。

$$r(\alpha_j, y_j) = \alpha_j r_0(y_j - y_i) / (y_j + \alpha_j a - y_i) \dots \dots \dots (2)$$

ただし、

$r(\alpha_j, y_j)$ ：ステップ j における道床縦抵抗力 (N/cm)

α_j ：ステップ j における軌きょうの変位方向を示す係数 (-1または1)

y_j ：平行移動量 ($= y^* - \alpha_j a r^*/(\alpha_j r_0 - r^*)$) (cm)

y^* ：ステップ j までの間で最後に変位方向が変わったときの変位 (cm)

r^* ：ステップ j までの間で最後に変位方向が変わったときの道床縦抵抗力 (N/cm)

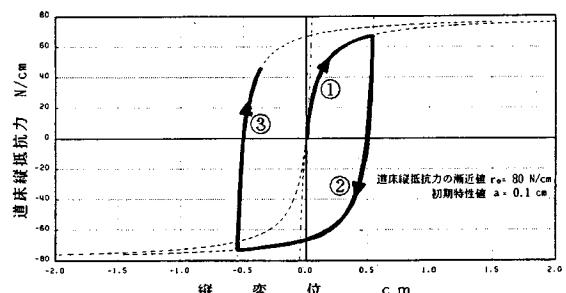


図-6 道床縦抵抗力モデル

3. ロングレール伸縮モデル

シミュレーションでは、計算を容易にするため、さしあたりロングレールの全長にわたって、レール種別、道床縦抵抗力の特性、設定温度ならびに温度変化が均一であるものとし、また橋桁の伸縮あるいは力行荷重および制動荷重などの外力の影響はないものとした。この場合ロングレールの挙動はロングレールの中央に対して対称となる。すなわち中央点が不動点となることから、ロングレールの中央位置を固定点とし端部から中央位置までを n ブロックに等分した図-7に示すモデルを考える。

ここで、計算を容易にするため、各ブロックに作用する道床縦抵抗力は各ブロックの中心に集中して働くものとし、その値は各ブロックの中心の変位に応じて変化するものとした。ブロックにおける力の平衡を図-8に示す。この平衡条件は式(3)で示される。

$$p_i - p_{i-1} - r_i = 0 \dots \dots \dots (3)$$

ただし、

i ：ブロック番号

p_i ：ブロック中心 i とブロック中心 $i+1$ の間の軸力 (N) (軸引張力を +とする)

r_i ：ブロック i に作用する道床縦抵抗力 (N)

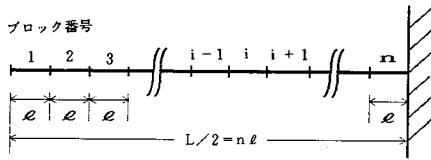


図-7 ロングレールの分割

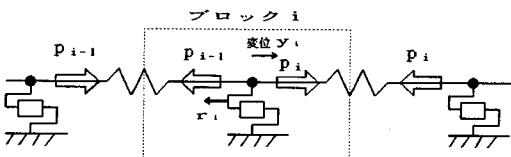


図-8 ブロックにおける力の平衡

また、ブロック中心 i とブロック中心 $i+1$ の間のレールのひずみの適合条件は、

$$(y_{i+1} - y_i)/l = p_i/EA - \beta t \dots \dots \dots \dots (4)$$

ただし、

y_i ：ブロック i の中心の変位 (cm)

l ：ブロックの長さ (cm)

E ：レール鋼のヤング係数 (2.06×10^7 N/cm²)

A ：レールの断面積 (cm²)

β ：レール鋼の線膨張係数 (°C)

t ：設定温度からの温度低下 (°C)

で表わされる。これを変形すると、

$$p_i = EA\beta t + EA(y_{i+1} - y_i)/l \dots \dots \dots \dots (5)$$

となる。また式 (3) および (5) から式 (6) が得られる。

$$y_{i-1} - 2y_i + y_{i+1} = r_i l / EA \dots \dots \dots \dots (6)$$

図-8において、ブロック 1 では $p_0 = 0$ であることから、

$$p_1 - r_1 = 0$$

となり、さらに式 (4) に代入すると式 (7) が得られる。

$$-y_1 + y_2 = r_1 l / EA - l\beta t \dots \dots \dots \dots (7)$$

また、 $i = n$ ではロングレールの中央点に対して対称であることから、 $y_{n+1} = -y_n$ となり式 (8) が得られる。

$$y_{n-1} - 3y_n = r_n l / EA \dots \dots \dots \dots (8)$$

式 (7), (6) および (8) をまとめて、行列で表わすと式 (9) となる。

$$\begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 0 \\ 1 & -2 & 1 & 0 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 0 \\ 0 & 1 & -2 & 1 & 0 & \cdot & \cdot & \cdot & 0 \\ \cdot & \cdot \\ 0 & \cdot & 0 & 1 & -2 & 1 & 0 & \cdot & 0 \\ \cdot & \cdot \\ 0 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 0 & 1 & -2 \\ 0 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 0 & 1 & -3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ \vdots \\ y_i \\ \vdots \\ y_{n-1} \\ y_n \end{bmatrix}$$

$$= \frac{l}{EA} \begin{bmatrix} r_1 - EA\beta t \\ r_2 \\ r_3 \\ \vdots \\ r_i \\ \vdots \\ r_{n-1} \\ r_n \end{bmatrix} \dots \dots \dots \dots (9)$$

すなわちロングレールの挙動は、与えられた道床縦抵抗力 r_i および温度低下 t に対して式 (9) を y_i に関する連立方程式として解く問題と考えることができる。

しかし、式 (9) の r_i は式 (2) から y_i の関数であることから、式 (9) は y_i に対して非線形であり、これを連立方程式として解析的に解くことは困難である。またその解も r_i が一定値であれば一意的に定まるが、 r_i の値は等しい y_i に対してもその履歴により異なる値となるため解の組は無数に存在する。

ここで近似計算ステップ k において、ブロック i の変位が $y_{i,k-1}$ から $y_{i,k}$ に変化したときの道床縦抵抗力 $r_{i,k}$ は変化前の道床縦抵抗力 $r_{i,k-1}$ を用いて式 (10) で表わすことができる。

$$r_{i,k} = r_{i,k-1} + r'_{i,k-1}(y_{i,k} - y_{i,k-1}) \dots \dots \dots \dots (10)$$

また $r_{i,k}$ は式 (2) ならびに図-6で示したように、ブロック i の変位方向が変わらない限りにおいて、同一の式で表わすことができる。さらに $r_{i,k}$ の 1 次微分 $r'_{i,k}$ および 2 次微分 $r''_{i,k}$ はそれぞれ式 (11) および式 (12) で示される。

$$r'_{i,k} = \alpha_{i,k}^2 a r_0 / (y + \alpha_{i,k} a - y_{i,k})^2 \dots \dots \dots \dots (11)$$

$$r''_{i,k} = -2 \alpha_{i,k}^2 a r_0 / (y + \alpha_{i,k} a - y_{i,k})^3 \dots \dots \dots \dots (12)$$

ここで式 (11) は $r_{i,k}$ が単調に増加あるいは減少することを、また式 (12) から軌きよう変位 $y_{i,k}$ が増加あるいは減少する場合には $r_{i,k}$ がそれぞれ上に凸あるいは下に凸であることを示している。

このことから、道床縦抵抗力の近似値 $r_{i,k}$ を逐次改良し、計算を進めることにより、 $y_{i,k}$ は図-9に示すとおり発散あるいは振動することなく解に収束する。式 (9)

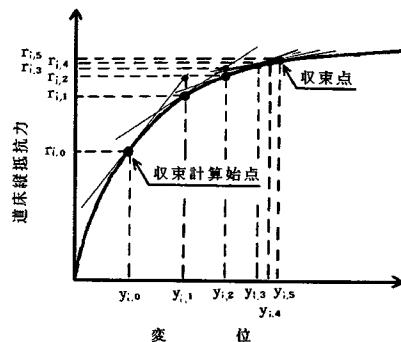


図-9 収束計算の考え方（ニュートン法）

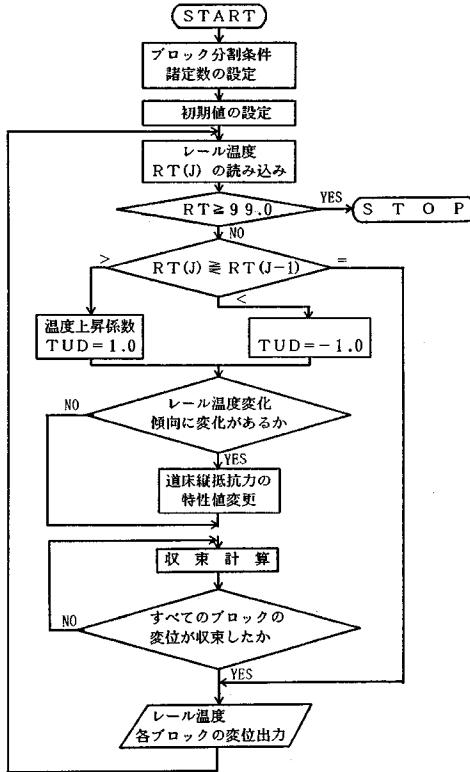


図-10 ロングレール伸縮計算フローチャート

で示される連立方程式のうち、 i 番目の方程式について式(10)を用いて整理すると式(13)となる。

$$y_{i-1,k} - 2y_{i,k} + y_{i+1,k} = \frac{l}{EA} (r_{i,k-1} + r'_{i,k-1}(y_{i,k} - y_{i,k-1})) \quad (13)$$

ここで、 $r_{i,k-1}$ 、 $r'_{i,k-1}$ および $y_{i,k-1}$ は、初期値から近似計算により逐次改良された既知の値であることから、これを整理すると式(14)が得られる。

$$\begin{aligned} y_{i-1,k} + \left(-2 - \frac{l}{EA} r'_{i,k-1} \right) y_{i,k} + y_{i+1,k} \\ = \frac{l}{EA} (r_{i,k-1} - r'_{i,k-1} y_{i,k-1}) \end{aligned} \quad (14)$$

同様にすべての連立方程式を整理し行列で表わすと式(15)が得られる。

$$\begin{bmatrix} -1 - \frac{l}{EA} r'_{1,k-1} & 1 & 0 & & & & & & 0 \\ 1 & -2 - \frac{l}{EA} r'_{2,k-1} & 1 & 0 & & & & & 0 \\ 0 & 1 & -2 - \frac{l}{EA} r'_{3,k-1} & 1 & 0 & & & & 0 \\ & & & \ddots & & & & & \\ 0 & 0 & 1 & -2 - \frac{l}{EA} r'_{i,k-1} & 1 & 0 & & & 0 \\ & & & \ddots & & & & & \\ 0 & \cdots & \cdots & 0 & 1 & -2 - \frac{l}{EA} r'_{n-1,k-1} & 1 & & \\ 0 & \cdots & \cdots & \cdots & 0 & 1 & -3 - \frac{l}{EA} r'_{n,k-1} & & \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} y_{1,k-1} \\ y_{2,k-1} \\ y_{3,k-1} \\ \vdots \\ y_{i,k-1} \\ \vdots \\ y_{n-1,k-1} \\ y_n \end{bmatrix} = \frac{l}{EA} \begin{bmatrix} r_{1,k-1} - r'_{1,k-1} y_{1,k-1} - EA\beta t \\ r_{2,k-1} - r'_{2,k-1} y_{2,k-1} \\ r_{3,k-1} - r'_{3,k-1} y_{3,k-1} \\ \vdots \\ r_{i,k-1} - r'_{i,k-1} y_{i,k-1} \\ \vdots \\ r_{n-1,k-1} - r'_{n-1,k-1} y_{n-1,k-1} \\ r_{n,k-1} - r'_{n,k-1} y_{n,k-1} \end{bmatrix} \quad (15)$$

式(15)は y_i について解くことができる。この手順を繰り返し、すべての i について y_i が収束すれば近似解が得られる。

ロングレールの設定時からの温度履歴に応じてレールの移動量を計算するシミュレーションプログラムのフローチャートを図-10に示す。またブロックごとのレール軸力 p_i は式(5)を用いてレールの移動量およびレール温度から計算することができる。

4. 営業線における測定値との対比

(1) 東海道本線辻堂構内

ロングレールの長期的な挙動を把握するため、昭和59年10月に東海道本線辻堂構内上り貨物線に敷設された延長870mのロングレールについて、敷設日以降レールの移動量8測点、レール温度2測点、大気温1測点について連続測定を実施し、さらに測定を継続している。そこで、レール温度とロングレール端部伸縮量の関係について実測値とシミュレーション結果の対比を図-11に示す。図-11から2.(2)における道床縦抵抗力の漸近値 r_0 については10N/cm、初期特性値 a については0.05cmきざみの組合せについて試算した結果、 $r_0=90$ N/cm、 $a=0.1$ cmの組合せが実測値に対し最もよい適合性をもつことが明らかになった。

(2) 常磐線土浦構内

昭和54年10月から55年10月まで約1年間にわたって、常磐線土浦構内に敷設されているロングレールの伸

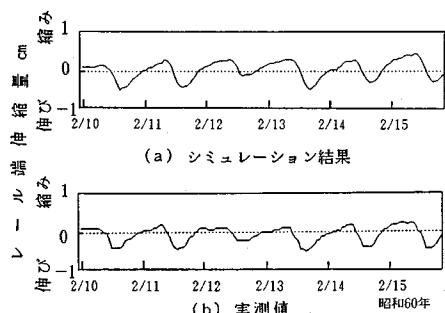


図-11 ロングレール端伸縮量の比較
(東海道本線辻堂構内、昭和60年2月)

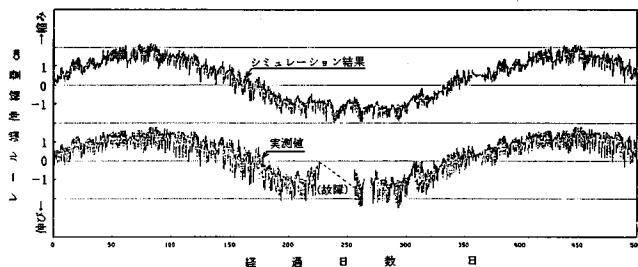


図-12 ロングレール端伸縮量の比較
(常磐線土浦構内, 昭和54年10月~55年11月)

縮量測定が行われた⁶⁾。この測定は測定装置の故障による一時的なデータの欠落はあるものの、ロングレールの長期的な挙動を連続的に測定したデータとしては数少ない例である。そこで1日ごとのレール温度の最大値と最小値を用いてロングレール端の移動量のシミュレーション計算を実施した。結果を図-12に示す。結果から長期的なロングレールの伸縮(年変化)に関しては、道床縦抵抗力の漸近値はその初期特性値 a を4.(1)の結果から0.1 cm とすれば、約60 N/cm であると推定できる。また短期的な伸縮特性に関しては同様に約40 N/cm と推定された。

(3) モデルの適合性

毎日の最高最低レール温度を用い、道床縦抵抗力の漸近値および初期特性値を変えて得られた計算結果は実測値とよく合致している。なおこの計算において1回のレール温度変化ごとの収束回数は4~7回であった。

5. 伸縮シミュレーション

(1) 温度履歴とロングレールの挙動

ロングレールの挙動が単にレール温度によるものではなく、それまでの温度履歴によることはすでに述べたとおりである。そこで3.で提案したシミュレーションプログラムを用いて、全長500 m のロングレールのレール軸力分布およびロングレール端伸縮量を計算した。想定したレール温度の変化は日平均温度の年較差30°C、1日の温度変化量30°Cの組合せとし、その変化は年間中位温度を25°Cとするサイン曲線とした。またロングレールの設定温度は35°Cとした。道床縦抵抗力に関する諸数値を図-13(a)に示すとおり $r_0=80 \text{ N/cm}$, $a=0.1 \text{ cm}$ とした場合の計算結果を図-14(a)に示す。一方、 $r_0=80 \text{ N/cm}$, $a=10^{-5} \text{ cm}$ とすれば、道床縦抵抗力は図-13(b)に示すようにほぼ一定値と考えることができる。このときのレール軸力分布およびロングレール端伸縮量の計算結果を図-14(b)に示す。

道床縦抵抗力を一定値と仮定した場合にはよく知られるようにロングレールの伸縮区間は端部に限られるが、

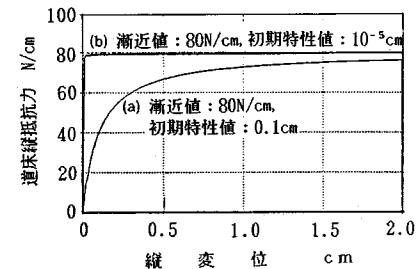
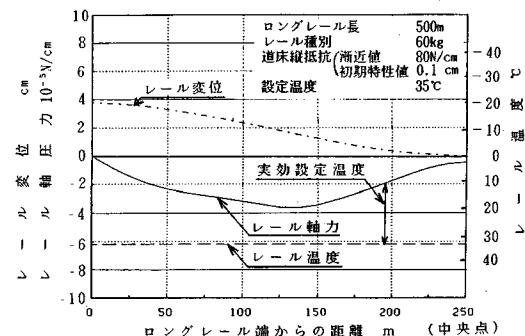
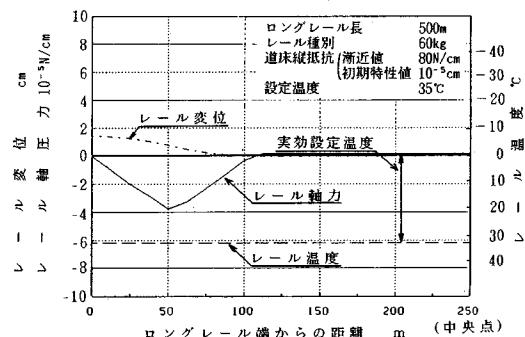


図-13 道床縦抵抗力の近似



(a) 道床縦抵抗力を双曲線で近似したとき



(b) 道床縦抵抗力をほぼ一定値としたとき

図-14 ロングレール各部の軸力および変位
(設定後3年経過)

道床縦抵抗力として2.のモデルを用いた場合には、3年後には伸縮区間が中央点近くまで伸び、ロングレールのほぼ全体に変位を生ずることが図-14(a)より認められる。これは従来実測されていた事実⁷⁾を説明できるものである。

(2) 実効設定温度の推移

ロングレールの管理にあたっては、設定温度だけではなく設定後の温度伸縮、部分的なレールのふく進、保守作業等による軸力分布への影響を考慮することが必要である。そこで、ロングレール各部の状態を示す指標として設定温度ならびに軸力分布を統合した「実効設定温度」を考える。この実効設定温度は、現実のレール軸力が0

となるレール温度を想定したものである。

そこで、ロングレール端から 50 m 間隔で 300 m までの位置においてシミュレーションにより求めたレール軸力から計算した実効設定温度の変化を図-15 に示す。この結果から図-14(a) における伸縮区間の延伸と同時に実効設定温度が変化し、しだいにレールの年間中位温度に近づいていくことが認められる。

(3) レール破断時開口量

低温時にロングレールが破断した場合の開口量は、列車の走行安全性にもかかわることから、高温時の座屈安定性と並んでロングレールの設計上の基本的な条件となっている。

2.(3) の道床縦抵抗力モデルに基づきレール破断時開口量を算出した。結果を図-16 に示す。

この結果によれば、道床縦抵抗力の漸近値が等しい場合でも、初期特性の差によって破断時開口量は 0.5 ~ 0.7 cm 程度異なることが推定される。

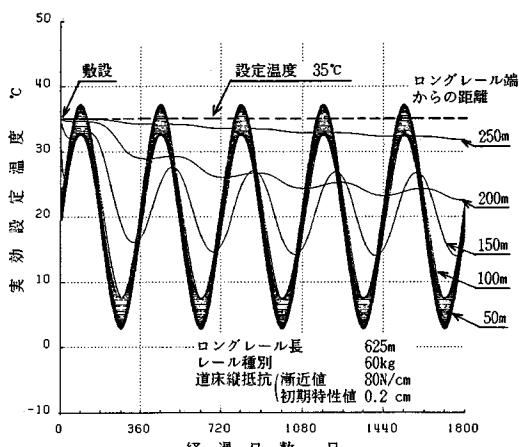


図-15 各部における実効設定温度の変化

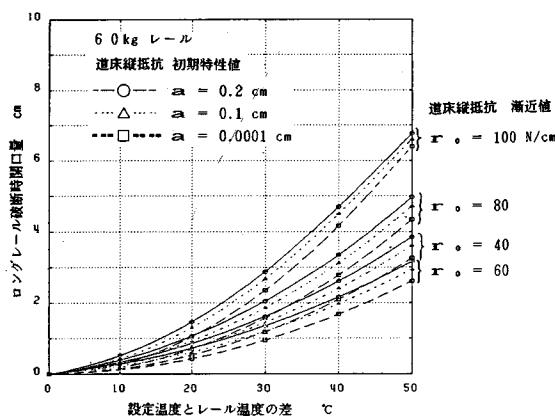


図-16 ロングレール破断時開口量

6. まとめと推定事項

以上の検討結果から、次の事項が明らかとなった。

(1) 本モデルは従来のモデルと比べ、道床縦抵抗力をより実態に即した非線形で履歴を有するものとしたことにより、ロングレール伸縮の実態をよく表現できる。

(2) 道床縦抵抗力が非線形な特性をもつことから、長期的な温度履歴のもとではロングレール端部の伸縮の影響が従来不動区間と考えられていた範囲まで及ぶこと、その結果この区間では実質的な設定温度の変動が生じ得ることが明らかとなった。

(3) シミュレーションを通じて、伸縮の及ばない範囲、すなわち不動区間が特定できることから、ロングレール不動区間ににおけるレール破断時あるいはレール交換の際に、レールに軸力を付加することのできるレール緊張器の使用等、不動区間ににおける設定替作業法の検討により 1 本のロングレールの延長を飛躍的に伸ばした長大ロングレール（スーパー長大ロングレール）実現の理論的根拠が明確にされた。

なお、辻堂構内におけるロングレール伸縮調査の実施は元国鉄東京南鉄道管理局によるものであることを記し、謝意を表する。

参考文献

- 星野陽一：長大レールの温度伸縮、鉄道業務研究資料、第 8 卷、第 2 号、p. 4、1951 年 1 月。
- 立花文勝・田中正彦・鈴木秀昭・沼田 実：曲線軌道座屈実験、鉄道技術研究資料、第 14 卷、第 7 号、pp. 292 ~ 307、1957 年 7 月。
- Teodoresco, C.C. : Calculation of the longitudinal stresses, according to variations in the temperature, in a section of line laid with long welded rails, Monthly Bulletin of the International Railway Congress Association Vol. 44, No. 10, pp. 637 ~ 652, Oct. 1967.
- Question D101 : Braking and acceleration forces on bridges and interaction between track and structure, Report No. 6, 9, 14 & 20, ORE, 1974, 1975, 1979 & 1983.
- 三浦 重・小林 悟・篠田七次：スラブ軌道上ロングレールの加熱試験、鉄道技術研究資料、第 32 卷、第 12 号、pp. 9 ~ 10、1975 年 12 月。
- 宮井 徹・細川岳洋・浜崎郷廣：ロングレールの伸縮調査、鉄道技術研究資料、第 41 卷、第 2 号、p. 15、1984 年 2 月。
- 根来幸次郎：鉄道保線施工法、山海堂、pp. 194 ~ 195、1959 年 7 月。
- Birmann, F. : Neuere Messungen an Gleisen mit verschiedenen Unterschwellungen, Eisenbahntechnische Rundschau, Vol. 6, Heft 7, pp. 227 ~ 246, Jul. 1957.
- Kerr, A. D. : An Improved Analysis for Thermal Track

- Buckling, Technical Report CE-78-16, Department of Civil Engineering, University of Delaware, p. 4, Oct. 1978.
- 10) Chu, K. and Lee, P. : Effect of Longitudinal Forces on Long Welded Tracks, Rail International Vol. 11, No. 1, pp. 23~34, Jan. 1980.
- 11) Samavedam, G., Kish, A. and Jeong, D. : Parametric studies on lateral stability of welded rail track, PB 83-215517 (DOT/FRA/ORD-83/07), National Technical Information Service, Virginia, pp. 6~8, May 1983.
- 12) 家田 仁・平田和敏：不連続条件下におけるロングレールの挙動に関する検討, 鉄道線路, 第 33 卷, 第 12 号, pp. 9~17, 1985 年 12 月.
- 13) 鈴木俊一・佐藤吉彦・高谷博文：加振時における道床横抵抗力の特性解析, 土木学会第 40 回年次学術講演会講演概要集, 第 4 部, pp. 67~68, 1985 年 9 月.
- 14) 宮井 徹・飯田啓善・細川岳洋：営業線における道床横抵抗力, 鉄道技術研究資料, 第 40 卷, 第 4 号, pp. 23~24, 1983 年 4 月.

(1986. 4. 11・受付)