

論文 吊り上げ式レール軸力測定法の改善 に関する一検討

遠藤 一彰¹・阿部 和久²・紅露 一寛³

¹学生会員 新潟大学大学院生 自然科学研究科(〒950-2181 新潟市西区五十嵐二の町 8050 番地)

²正会員 工博 新潟大学教授 工学部社会基盤工学プログラム(〒950-2181 新潟市西区五十嵐二の町 8050 番地)

E-mail: abe@eng.niigata-u.ac.jp

³正会員 博(工) 新潟大学教授 工学部社会基盤工学プログラム(〒950-2181 新潟市西区五十嵐二の町 8050 番地)

吊り上げ式レール軸力測定法を対象に、レール吊り上げ位置を含む2箇所における曲げモーメントと相対たわみ量とを計測することで、そこより遠方における軌道条件の影響を完全に排除し得る方法を提案した。3次元軌道モデルによる数値解析を通して、解放区間長を10m程度にまで短縮可能であることを確認した。また、レール頭頂面の磨耗によるレール断面二次モーメントと中立軸位置の変化が、軸力算出値に及ぼす影響について検討した。その結果、60kgレールで相対たわみ量を0.05mと比較的小さく設定した場合、レール軸力測定誤差が60kN程度と幾分大きい値をとるものの、実用上支障を来す程の精度低下は生じないことがわかった。

Key Words: VERSE, continuous welded rail, thermal stress, non-destructive method

1. はじめに

ロングレールは、その両端の可動区間を除けば、まくらぎ締結によりふく進がほぼ拘束される。そのため、不動区間のレール内には温度変化に伴って引張または圧縮の温度応力が発生する。過大なレール軸力の発生は、引張時にはレール破断に、一方圧縮時には軌道座屈(張り出し)に至る危険性を有しており、軌道保守上その把握は重要となる。

ロングレールを適正に管理するためには、レール軸力の絶対量を知る必要がある。これまでに様々な軸力測定法が考案されて来たが、初期軸力の把握を必要とせず、絶対量が測定可能な手法の内、現在実用化されているものは「吊り上げ式レール軸力測定法^{1),2)}」のみである。海外で考案・実用化された当該測定法は VERSE と呼ばれており、引張軸力発生時のみを対象とした手法ではあるが、良好な精度で軸力の評価が可能となっている³⁾。VERSE の具体的測定手順としては、まず30mにわたりレール締結を解放し、続いて解放端から5mの位置にブロックを挿入してレールを支持し、その下でレール中央部を専用ジャッキで吊り上げ、その間に吊り上げ量と吊り上げ力を測定するというものである(図-1)。具体的な軸力換算式などは公開されていないが、はりのたわみ剛性の軸力依存性を利用して、荷重-たわみ曲線の傾きの変化から軸力を評価する方法を採っているものと考えられる⁴⁾。

我国において VERSE を導入する場合、30mの解放

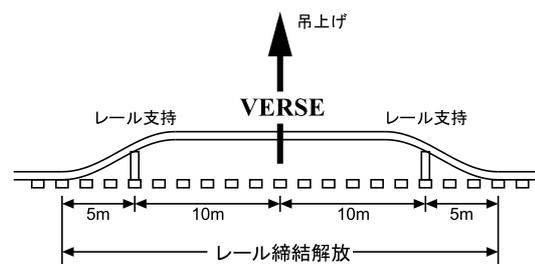


図-1 VERSE による軸力測定法の概要

区間長が冬季の温度低下時における作業制限に抵触するため、そのままでの適用はできない。そのため文献4)では、レール緩解長の短縮が軸力測定精度に及ぼす影響について検討し、20mまで短縮可能との結論が得られている。これにより、レール締結の緩解長が2/3にまで短縮され、国内での適用が可能となったものの、未だ相当な距離にわたり解放する必要があるため、作業量軽減のためには、解放区間長のさらなる短縮が望まれる。

本研究では、上述のような状況に鑑みて、吊り上げ式レール軸力測定法におけるレール締結の解放区間長のさらなる短縮を目的とし、それを可能とする測定法について検討する。VERSEにおいてレール緩解長を少なくとも20m以上に設定せざるを得ない理由は、それより遠方における軌道構造が上述のたわみ剛性に及ぼす影響を排除しつつ、測定精度を担保し得るレール吊り上げ量を確保する必要があるためである⁴⁾。レール

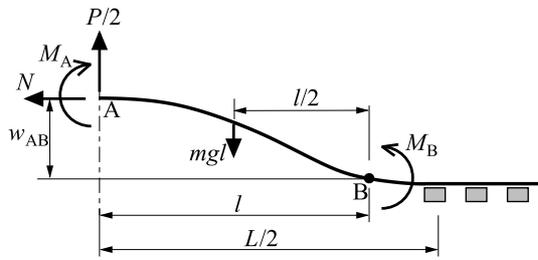


図-2 提案測定法の概略図

吊り上げ位置からレール解放端までの距離が短ければ短い程、締結部の剛性やまくらぎ質量、道床支持剛性などが、レール吊り上げ時のたわみ剛性に及ぼす影響が顕著となり無視し得なくなる。

そこで本研究では、レール解放区間外の条件に依存しない測定法を提案する。具体的には、レール解放区間中央の吊り上げ位置と解放端より内側の一箇所における相対レールたわみ量と曲げモーメントを求め、モーメントのつり合い条件から軸力を算出する方法について考える。本手法による場合、モーメント測定位置より遠方におけるレール拘束条件の影響を完全に排除することが可能であり、緩解長の短縮が期待できる。

以下では、レール・まくらぎで構成される軌きょうを3次元はり要素により離散化して作成した数値モデルに基づき、上述の測定法の妥当性や精度について検討する。さらに、レール頭頂面の磨耗によるたわみ剛性等の変化が、測定誤差に及ぼす影響についても調べる。

2. 提案測定法の原理

図-2に示す様に、区間長 L にわたり軌道の左右レール何れか一方の締結を解放し、その中央を吊り上げるものとする。図-2には、軌道長手方向の対称条件を考慮して、吊り上げ位置より右半分のみを示している。吊り上げ過程において、吊り上げ位置 (A 点) と、そこから l 離れた箇所 (B 点) とにおけるレール曲げモーメントと相対たわみ量とを測定する。なお曲げモーメントは、鉛直たわみによって発生するレール断面強軸 (水平軸) 回りの成分を対象とする。当該の曲げモーメントは、例えばひずみゲージ貼付によって評価するものとする。また B 点の位置は、A 点との相対たわみ量が十分な精度で測定可能な程度に大きな値をとる様に、A 点から離すものとするが、その条件をみだす限り設定位置は任意である。

A, B 点間のレールはまくらぎから浮き上がっており、軌道パッドや締結装置には一切接触していないものとする。この時、当該区間のレールには、A, B 両端曲げモーメント、せん断力、レール軸力、および自重が断面

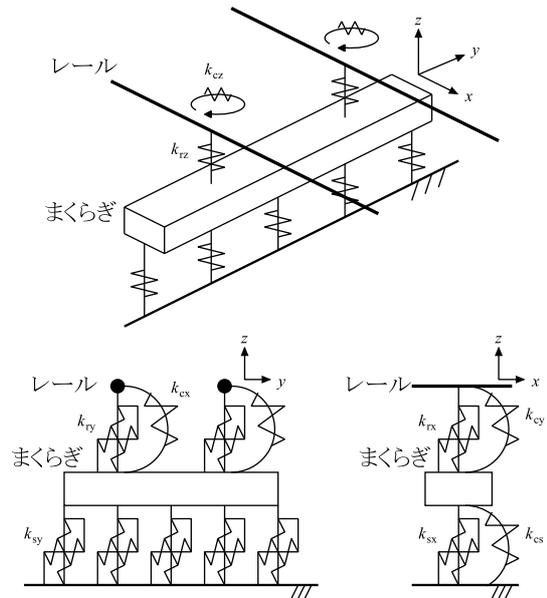


図-3 3次元軌道モデル

力や外力として作用している。すると、B 点におけるモーメントのつり合い条件より次式を得る。

$$M_A - M_B - N \cdot w_{AB} + \frac{Pl}{2} - \frac{mgl^2}{2} = 0 \quad (1)$$

ここで、 M_A, M_B はそれぞれ A, B 点における曲げモーメントであり、その正の向きは図-2のように定義する。また、 N は引張軸力、 w_{AB} は A, B 点間の相対たわみ、 P はレール中央に作用している吊り上げ力、 m はレールの単位長さ当りの質量、 g は重力加速度である。

式 (1) をレール軸力 N について解くと次式を得る。

$$N = \frac{1}{w_{AB}} \left(M_A - M_B + \frac{Pl}{2} - \frac{mgl^2}{2} \right) \quad (2)$$

式 (2) の右辺において、 M_A, M_B は締結解放区間より遠方におけるレール拘束条件などの軌道構造に依存するものの、未知量は一切含まれていない。したがって、VERSE とは異なり、理論上は解放区間長を任意に設定可能となる。

3. 軌道モデルの概要

本研究では有道床軌道を対象とし、軌きょうを3次元モデルにより表現して、それに基づく数値実験を通して提案測定法の妥当性について調べる。レール・まくらぎは微小変位仮定の下、Timoshenko ばり要素⁵⁾で離散化し、さらに捩り変形を考慮する。特にレールについては、たわみ剛性に対して軸力の影響を考慮して定式化する⁶⁾。レール・まくらぎ間締結の剛性は、相対変位と回転に関する3次元成分をバネおよび回転バネにより表現する (図-3)。一方、まくらぎ・道床間は、相対変位に関するバネを3成分設定し、回転については

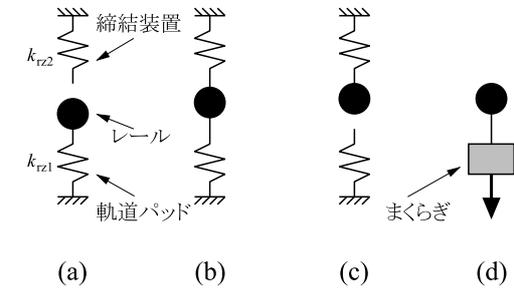
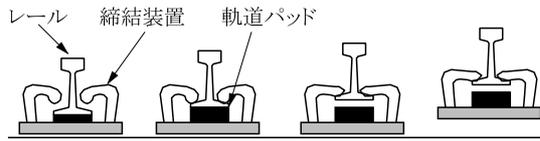


図-4 レール吊り上げ過程における締結部のモデル化

まくらぎ長手方向軸回りについてのみ考慮して回転バネを導入する。

吊り上げ過程におけるレール・まくらぎ間剛性については、文献7)を参考に設定する。具体的には、図-4に示す様に、軌道パッドと締結装置に関する鉛直方向の剛性をそれぞれバネ k_{rz1} 、 k_{rz2} により表現する⁴⁾。通常、レールは下方から軌道パッド、上方から締結装置により拘束力を受け、図-4(b)の状態にある。レールの吊り上げ過程において、吊り上げ側レール締結解放端近傍の締結部では、レール底面が軌道パッドから浮き上がり図-4(c)の状態が発生し得る。さらに吊り上げ量が大きくなると、まくらぎ下面がバラスト道床から浮き上がる(図-4(d))。一方、締結解放端より幾らか遠方においては、レールが下方に変位する可能性がある。この際に締結装置による拘束力がゼロとなり、軌道パッドからの反力のみが作用する図-4(a)の状態が生じ得る。

なお、締結解放区間については、上述の締結装置に関するバネ k_{rz2} を取り除いておく。この場合、レールが軌道パッドから離れた時点でレールに浮き上がりが生じたものと判定する。

まくらぎ・バラスト道床間バネの設定については、鉛直接触力が圧縮時のみ作用する様に設定し、上述のとおりまくらぎの浮き上がりを考慮する。

以下の解析では、まず吊り上げ力が作用していない状態の下で、レールとまくらぎに自重を作用させて初期のつり合い状態を求める。次に、レールに吊り上げ力を加え、その値を徐々に増加させつつ、増分ステップ毎に前述の状態(a)~(d)を逐次更新してつり合い解を求めて行く。

表-1 50kgN レールに関する諸量

レール質量	50.4(kg/m)
断面積	$64.05 \times 10^{-4}(\text{m}^2)$
断面二次モーメント(水平軸)	$1960 \times 10^{-8}(\text{m}^4)$
断面二次モーメント(鉛直軸)	$322 \times 10^{-8}(\text{m}^4)$
せん断係数(水平軸)	0.394
せん断係数(鉛直軸)	1.382
St.Venant 捩れ係数	$1.64 \times 10^{-6}(\text{m}^4)$
断面の重心から底面までの距離	0.072(m)
断面の重心から捩れ中心までの距離	0.04(m)
弾性係数	206(GPa)
ポアソン比	0.33

表-2 60kg レールに関する諸量

レール質量	60.80(kg/m)
断面積	$77.5 \times 10^{-4}(\text{m}^2)$
断面二次モーメント(水平軸)	$3090 \times 10^{-8}(\text{m}^4)$
断面二次モーメント(鉛直軸)	$512 \times 10^{-8}(\text{m}^4)$
せん断係数(水平軸)	0.394
せん断係数(鉛直軸)	1.382
St.Venant 捩れ係数	$1.64 \times 10^{-6}(\text{m}^4)$
断面の重心から底面までの距離	0.078(m)
断面の重心から捩れ中心までの距離	0.021(m)
弾性係数	206(GPa)
ポアソン比	0.33

4. 解析結果に基づく検討

(1) 解析条件

3.に述べた3次元軌道モデルによる数値実験を通して、本測定法の妥当性について検討する。解析に当り、まくらぎ間隔を0.6mとし、軌間1.067mの軌道構造を想定してレールとまくらぎのはり要素を配置した。レールは各まくらぎ間を2要素で分割し、対称条件により軌道長手方向について半分のみモデル化して、当該区間長をまくらぎ50本分(30m)に設定した。また、各まくらぎを4要素で離散化した。

レールについては、50kgN、および60kgレールの2種類を検討対象とし、それぞれ表-1、表-2のように諸量を設定した。まくらぎに関する物性値は表-3⁴⁾のとおり、またレール・まくらぎ間、およびまくらぎ・道床間に設けた各種バネ定数については表-4⁶⁾のとおり与えた。なお、まくらぎ下のバネははり要素節点5箇

表-3 PC まくらぎの各種物性値

質量	167(kg)
断面積	333(cm ²)
長さ	2.0(m)
軌間	1.14(m)
断面二次モーメント (水平軸)	6.24×10^{-8} (m ⁴)
断面二次モーメント (鉛直軸)	1.37×10^{-8} (m ⁴)
せん断係数 (水平軸)	0.67
せん断係数 (鉛直軸)	0.67
St.Venant 捩れ係数	2.0×10^{-4} (m ⁴)
弾性係数	78(GPa)
ポアソン比	0.17

表-4 各種ばね定数

締結装置ばね定数	
レール方向ばね定数 (k_{rx})	0.4(MN/m)
まくらぎ軸方向ばね定数 (k_{ry})	0.96(MN/m)
軌道パッドばね定数 (k_{rz1})	110(MN/m)
締結装置鉛直方向ばね定数 (k_{rz2})	20(MN/m)
レール軸回り回転ばね定数 (k_{cx})	390×10^3 (MN·m/rad)
まくらぎ軸回り回転ばね定数 (k_{cy})	0.29(MN·m/rad)
鉛直軸回り回転ばね定数 (k_{cz})	0.006 (MN·m/rad)
まくらぎ下ばね定数	
レール方向ばね定数 (k_{sx})	1000(MN/m)
まくらぎ軸方向ばね定数 (k_{sy})	2(MN/m)
鉛直方向ばね定数 (k_{sz})	120(MN/m)
まくらぎ軸回り回転ばね定数 (k_{cs})	3.3(MN·m/rad)

所に配置しているが、表-4 のばね定数はまくらぎ 1 本当りの値である。

(2) 式 (2) による軸力評価の妥当性の確認

50kgN レールを例に、レール引張軸力 N (引張を正) を 500kN(相対温度で約-31℃) までの範囲で設定して解析を行った。本測定法の妥当性を確認する目的で、レール解放区間長を $L=19.8\text{m}$ として、図-2 における B 点を解放端まくらぎから二つ内側のまくらぎ位置 ($l=8.7\text{m}$) に設定し、相対たわみ量 $w_{AB}=0.1\text{m}$ でレールを吊り上げた場合を対象に、軸力の評価を試みた。なお、レール吊り上げ位置がまくらぎスパンの中心となる様に解放区間をとっている。結果を図-5 に示す。図-5 より、式

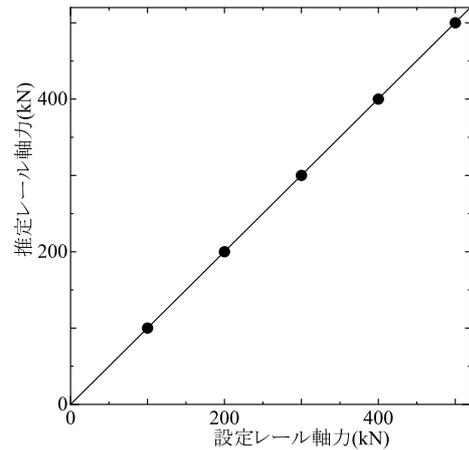


図-5 式 (2) による軸力の評価結果 ($L=19.8\text{m}$, $l=8.7\text{m}$, 相対たわみ量 0.1m の場合)

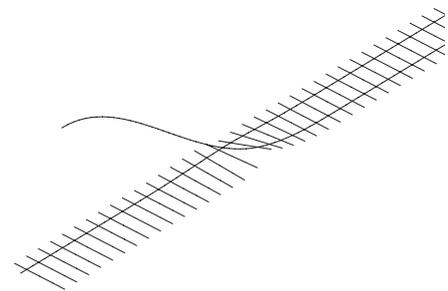


図-6 レール吊り上げ時の変形の様子 ($N=300\text{kN}$, $L=19.8\text{m}$, $l=8.7\text{m}$, 相対たわみ量 0.1m の場合)

(2) によって軸力によらず適切な評価がなされていることが確認できる。

$N=30\text{kN}$ の場合を例に、相対たわみ量 0.1m における軌道の変形の様子を図-6 に示す。なお、図-6 では、鉛直変位を 20 倍に拡大して表示している。レール吊り上げ箇所から両側各々 16 本のまくらぎ締結を解放しているが、17 本目の締結まくらぎがレールと共に浮き上がっている様子が確認できる。

(3) レール解放区間長の検討

軸力測定時の作業量軽減を図るためには、レール締結の緩解長は短い程良い。ただし、短か過ぎるとレールたわみ量が小さくなり、相対たわみの測定精度の確保が困難になることが予想される。一方、所定の吊り上げ量を得るためには、吊り上げ力も大きくなり、レール断面に作用する曲げモーメントの増大につながる。これはレールひずみの増大をも意味するため、ひいては塑性変形の発生が懸念される。

そこで、十分な精度で測定可能な相対たわみ量とし

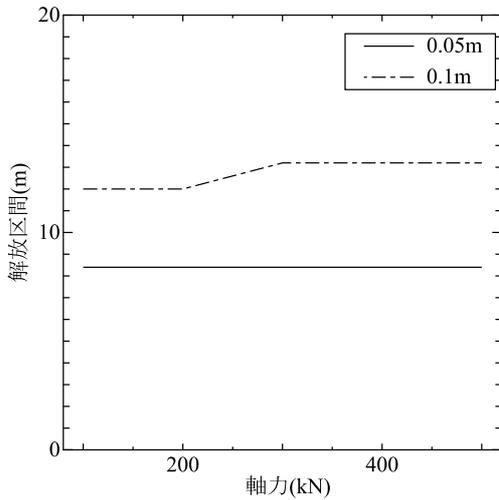


図-7 最小レール解放区間長 (50kgN レール)

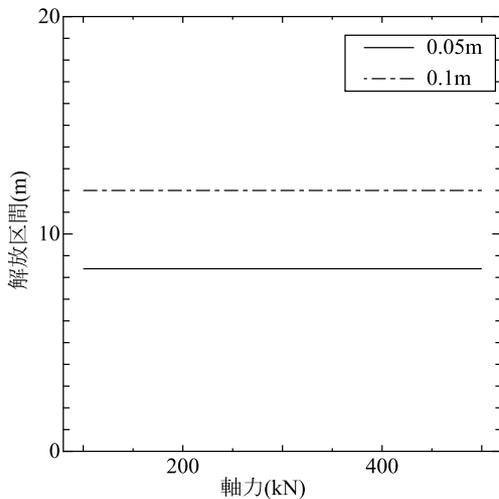


図-8 最小レール解放区間長 (60kg レール)

て、0.05m および 0.1m の 2 ケースを設定し、その下でレール断面に作用する最大曲げひずみが弾性域内に十分収まる様に 1×10^{-3} を上限ひずみ量として、当該条件をみたすレール解放区間長 L について調べた。なお、たわみ・曲げモーメント測定点 B は、解放端から一つ内側のまくらぎ位置とした。

50kgN レールと 60kg レールに対する結果をそれぞれ図-7、図-8 に示す。図の縦軸は上述の条件をみたす最短の解放区間長 L である。0.05m の相対たわみ量であれば、レール種別・軸力によらず $L=8.4\text{m}$ まで短縮可能であることがわかる。一方、0.1m の相対たわみ量を確保する場合、解放区間長を 12~13.2m まで拡張する必要がある。これは、レール相対たわみ量を増大させつつ、最大曲げひずみを所定の値以下に抑える必要があるため、自ずとレール解放区間長の拡張が不可避となるためである。

たわみの測定精度は用いる測定法に依存するが、仮

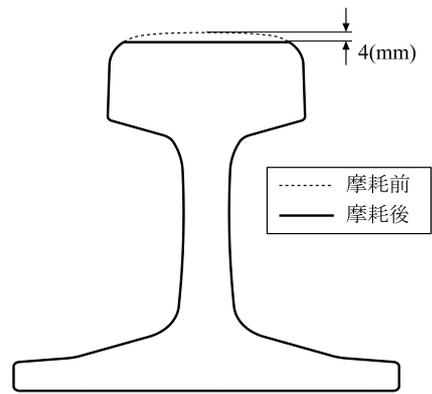


図-9 レール頭頂面磨耗の考慮

にそれを 0.001m 程度と仮定する場合、0.05m の相対たわみ量で測定したとしても、その誤差は 2% であり、軸力測定には十分な精度が確保可能である。また、ひずみに関しては、通常 10×10^{-6} 程度の精度は期待できるので、最大ひずみより曲げモーメントを換算する場合、その誤差は 1% 以下に抑えられるものと考えられる。

以上より、0.05m の相対たわみ量で測定すれば、十分な軸力測定精度を確保しつつ、レール解放区間長を 10m 以下にまで短縮可能である。

(4) レール頭頂面磨耗が精度に及ぼす影響

式 (2) による軸力算出において、レールの曲げモーメント M_A 、 M_B は、上述のとおり曲げひずみ ε から次式により求めることを想定している。

$$M = \frac{EI\varepsilon}{z_n} \quad (3)$$

ここで、 z_n はレール中立軸からひずみ測定箇所までの距離、 E はヤング率、 I は断面二次モーメントである。レールの断面二次モーメントと中立軸位置とに公称値を用いる場合を想定すると、レール頭頂面磨耗により、式 (3) から算出される曲げモーメントは真値とは異なる値を与えることとなる。磨耗しているレールの断面二次モーメントと中立軸からひずみ測定箇所までの距離をそれぞれ I' 、 z'_n とすると、式 (2) よりこれらに起因する軸力測定誤差 ΔN は次式で与えられる。

$$\Delta N = \frac{M_A - M_B}{w_{AB}} \left(\frac{I' - I}{I} - \frac{z'_n - z_n}{z_n} \right) \quad (4)$$

なお、式 (4) において、レール質量減少の影響は、曲げモーメントの評価誤差に比べわずかであるため無視している。ただし、以下に示す解析では、これらの影響も考慮している。

曲げモーメントの評価誤差に因る軸力測定誤差を定量評価するために、具体例として図-9 に示す様にレール頭頂面が 4mm 磨耗した断面形状について検討した。なお、図-9 は 50kgN レールの場合を示したものである。

表-5 レール摩耗が及ぼす影響 (50kgN レール)

0.05m 相対たわみ		
解放長 (m)	設定軸力 (kN)	誤差 (kN)
8.4	100	41.58
8.4	200	41.72
8.4	300	42.04
8.4	400	42.38
8.4	500	42.53
0.1m 相対たわみ		
解放長 (m)	設定軸力 (kN)	誤差 (kN)
12.0	100	26.38
12.0	200	26.57
13.2	300	24.77
13.2	400	24.99
13.2	500	25.13

表-6 レール摩耗が及ぼす影響 (60kg レール)

0.05m 相対たわみ		
解放長 (m)	設定軸力 (kN)	誤差 (kN)
8.4	100	61.65
8.4	200	61.96
8.4	300	62.28
8.4	400	62.42
8.4	500	62.84
0.1m 相対たわみ		
解放長 (m)	設定軸力 (kN)	誤差 (kN)
12.0	100	39.73
12.0	200	39.84
12.0	300	39.97
12.0	400	40.16
12.0	500	40.47

50kgN レールと 60kg レールについて、式 (4) より求めた軸力の誤差を、それぞれ表-5、表-6 に示す。ここでは、磨耗による中立軸位置からの距離の変化量が最も大きくなるケースとして、レール頭頂面でひずみを測定する場合を想定している。なお、レール解放区間長は、4.(3) での結果に基づき、レール種別と相対たわみ量に合わせて適宜設定している。これらの表より、相対たわみ量 w_{AB} が大きい程、断面欠損の影響が低減されていることがわかる。式 (4) より、断面二次モーメントと中立軸からの距離における変化量を一定値とした下では、より大きな曲げモーメント、およびより小さな相対たわみに対して軸力測定誤差が増大することとなる。ここでは、曲げひずみに上限を設定しているため、発生する曲げモーメントも概ね一定値をとる。そのため、相対たわみ量が小さい $w_{AB} = 0.05m$ のケースでの誤差が大き目の値を示す結果となっている。

ただし、軸力測定誤差は、それが最大となるケース (60kg レール、相対たわみ量 0.05m) においても、軸力によらず 60kN 程度と比較的小さく、実用上大きな支障を生じない範囲内に精度が保たれている。

5. おわりに

本研究では、吊り上げ式レール軸力測定法を対象に、レール締結の解放区間長の短縮を可能とする新たな手法について、数値モデルを用いて基礎的検討を行った。その結果、提案法では、レール吊り上げ位置を含む 2 箇所での曲げモーメント (曲げひずみ) と相対たわみ量とを計測する必要があるものの、解放区間長を 10m 前後にまで短縮可能であることが確認できた。

また、レール頭頂面の磨耗によるレール断面二次モー

メントと中立軸位置の変化が、軸力算出値に及ぼす影響について検討した。その結果、60kg レールで相対たわみ量を 0.05m と比較的小さく設定した場合、レール軸力測定誤差が 60kN 程度となり検討したケースの中では最も大きな値をとるものの、実用上支障を来たす程の精度低下にまでは至らないことがわかった。

以上より、提案測定法によれば、VERSE で本来必要とされていた解放区間長 30m に比べ、大幅な短縮が期待できることがわかった。

なお今後は、さらなる解放区間長短縮の可能性について検討するつもりである。

参考文献

- 1) van Tonder, J.P.A. : Determining the stress-free temperature of continuous welded rails (CWR), UIC-ERRI Interactive Conf., Paris, 1-6, 1998.
- 2) Lemon, C. and Gostling, R.J. : The non-destructive measurement of stress-free temperature in continuous welded rail, WCRR99, DS3-3, 1999.
- 3) Vortok International : An operator's guide to VERSE - A non-destructive method of stress free temperature (SFT) measurement, United Kingdom Version, 2000.8.
- 4) 田中洋介, 阿部和久, 元好 茂 : 吊り上げ式レール軸力測定法に関する解析的検討, 鉄道工学シンポジウム論文集, 15, 112-119, 2011.
- 5) Nickel, R.E. and Secor, G.A. : Convergence of consistently derived Timoshenko beam finite elements, Int. J. Numer. Meth. Engng., 5, 243-253, 1972.
- 6) 清水紗希, 阿部和久, 相川 明, 紅露一寛 : 3次元はり要素を用いた軸力を受ける軌道系の波動伝播解析, 鉄道力学論文集, 14号, 75-82, 2010.
- 7) 佐藤吉彦 : 向上法によるスラブ軌道レール軸力の測定, 平成 14 年鉄道技術連合シンポジウム (J-Rail2002) 論文集, 47-50, 2002.

(2017. 4. 7 受付)

AN IMPROVEMENT IN RAIL LIFTING METHOD FOR RAIL AXIAL FORCE MEASUREMENT

Kazuaki ENDO, Kazuhisa ABE and Kazuhiro KORO

An improvement in the rail lifting method, which has been developed as a non-destructive measurement method for rail axial thermal stress, is attempted. It is realized by the measurement of bending moments and rail deflection at two portions of the lifting and other rail sections locating within the unfastened range. The proposed method is independent of any mechanical conditions of the farther track region. Therefore, considerable shortening of the unfastened length can be expected. The method is validated through numerical experiments based on a three-dimensional track model. Influence of change in the rail cross section due to wear on the measurement error is also investigated. It is concluded that the unfastened range of the proposed method can be about 3 times shorter than that of the conventional rail lifting method.