

吊り上げ式レール軸力測定法におけるひずみ評価の効率化に関する検討

新潟大学大学院自然科学研究科 学生員 滝林裕太
 新潟大学工学部建設学科 正会員 阿部 和久
 新潟大学工学部建設学科 正会員 紅露 一寛

1. はじめに

レール継目部の無いロングレールは、軌道破壊、騒音、振動の低減に有効であり、在来線への導入が進められている。しかし、温度変化による軸力の発生は座屈や破断の原因となるため、レール軸力を正確に測定し、保守管理を適切に行う必要がある。現在実用化されているレール軸力測定法に、吊り上げ式レール軸力測定法（以下 VERSE）がある（図 1）。

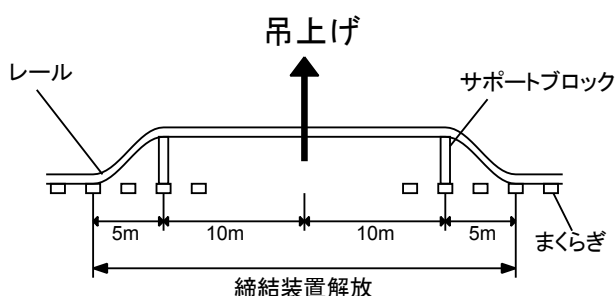


図 1 VERSE の概略図

これは、レール締結を 30m の区間に渡り解放する必要がある、我国の作業制限に抵触していたが、既往の研究¹⁾により、20m までの短縮が可能となった。また、さらなる短縮策が提案された²⁾がこれにはレールの曲げモーメントを 2 箇所で測定する必要がある。その際にひずみゲージを用いる場合、貼付に手間を要するため、更なる省力化が望まれる。そこで本研究では、画像からひずみを求める手法として、サンプリングモアレ法³⁾の適用可能性について数値シミュレーションに基づき検討する。

2. 文献 2) の軸力測定法

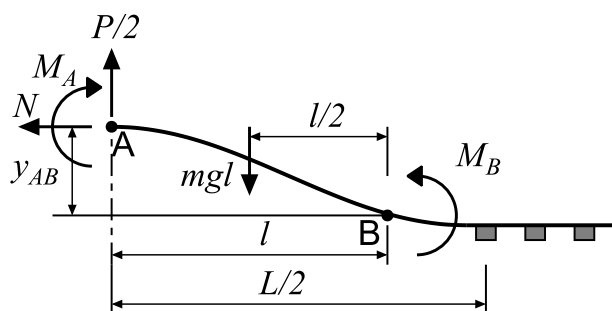


図 2 測定法の概略図

図 2 に示す様な状態を考える。レール解放区間中央の吊

り上げ位置 A 点と解放端より内側の一箇所 B 点とにおける相対レールたわみ量 y_{AB} と曲げモーメント M_A, M_B を求め、モーメントのつり合い条件から軸力を算出する。A 点と B 点を端点に持つ区間について、モーメントのつり合い条件よりレール引張軸力 N について解くと次式を得る。

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

ここで l は AB 点間距離、 P は A 点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) において P, M_A, M_B, y_{AB} は測定データとして与えられる。よって式 (1) 右辺に軌道状態に関する不確定量は存在せず、原理的には緩解長に制限はない。そのため解放区間長の短縮が期待される。

3. サンプリングモアレによるひずみ計測

(1) サンプリングモアレ法³⁾

曲げモーメントの測定にはひずみゲージの貼付による方法などが考えられる。ここでは、より容易にひずみ評価を行うために、サンプリングモアレ法によるひずみ計測について検討を行う。

輝度 $I(x)$ が次式で与えられている周期画像パターン (図 3) について考える。

$$I(x) = a \cos \frac{2\pi}{p} x + b \quad (2)$$

ここで、 p は周期長、 a, b は定数である。変形前の x における位相 ϕ_1 と、変位 u を生じた後の位相 ϕ_2 は、それぞれ次式で与えられる。

$$\phi_1 = \frac{2\pi}{p} x, \quad \phi_2 = \frac{2\pi}{p} (x - u) \quad (3)$$

すると、変位 u は次式で与えられる。

$$u = \frac{p}{2\pi} (\phi_1 - \phi_2) \quad (4)$$

以上より、変位発生前後の位相 ϕ_1, ϕ_2 が得られれば、変位 u を求めることができる。まず、周期画像の i 番ピクセルより、 n ピクセル毎にサンプリングする。それを補間して得られる輝度 I_j は次式で与えられる。

$$I_j = a \cos \left(\phi_i - \frac{2\pi}{n} j \right) + b \quad (5)$$

Key Words: 軌道保守, 省力化, サンプリングモアレ法

連絡先: 〒 950-2181 新潟市西区五十嵐二の町 8050 番地 TEL: 025(262)7274, FAX: 025(262)7274

ここで, ϕ_i は I_0 の i 番ピクセルの位相である. 位相 ϕ_i は次式より求めることができる.

$$\phi_i = \tan^{-1} \left(\frac{\sum_j I_j \sin \frac{2\pi}{n} j}{\sum_j I_j \cos \frac{2\pi}{n} j} \right) \quad (6)$$



図3 フリンジ画像

(2) 本手法への適用

図2のA点は吊り上げ点となるので, 直接的にA点でのひずみをサンプリングモアレ法により求めることはできない. ここではA点近傍でのひずみから M_A を求める手法について述べる. 吊り上げ点から x の断面における曲げモーメント M_x は, レールの自重を無視すると次式で与えられる.

$$M_x = M_A - N\bar{y} + \frac{P}{2}x \quad (7)$$

ここで, $\bar{y}$ はA点からの点 x における相対たわみである. ひずみ ϵ と M_x の関係は次式で与えられる.

$$\epsilon = \frac{M_x}{EI} \bar{z} = -\frac{\bar{z}}{EI} (M_A - N\bar{y} + \frac{P}{2}x) \quad (8)$$

ここで, $\bar{z}$ はひずみの評価点の中立軸からの距離である. $\bar{y}$ は他の項に比べ無視し得るものとする, 吊り上げ位置から s における相対水平変位 u_s は次式で与えられる.

$$u_s = \int_0^s \epsilon dx = -\frac{\bar{z}}{EI} (M_A s + \frac{P}{4}s^2) \quad (9)$$

式(9)を M_A について解くと次式を得る.

$$M_A = -\left(\frac{EI}{\bar{z}} \frac{u_s}{s} + \frac{P}{4}s\right) \quad (10)$$

式(10)より, u_s が得られれば M_A を評価できる.

(3) 軸力推定の数値実験

文献2)の2点測定法の下, レール変形前後の周期パターンの擬似的な変位データを数値シミュレーションにより求め, 曲げひずみをサンプリングモアレ法で測定する. 解析結果を表5に示す. ここで, **case1** 及び **case2** はそれぞれ, y_{AB} の測定精度を 1mm, 0.1mm とした場合の推定値である. ϵ が 1000μ に達した時点での吊り上げを対象としているが, 解放区間長の短縮に伴い, 当該時点での相対たわみ量 y_{AB} が減少し, その測定誤差が軸力評価に与える影響が大きくなり, 4.8m 未満では誤差が 50kN を超える結果となったものの, それ以上の解放区間では十分な精度での軸力測定が可能であることが分かった.

表1 軸力推定結果

2*解放区間長 (m)	軸力 (kN)		
	設定軸力	case1	case2
8.4	200	218.6	218.3
7.2	200	213.1	225.7
6.0	200	233.8	234.8
4.8	200	243.6	248.4
3.6	200	286.7	287.4

(4) はりのひずみ測定実験

数値シミュレーションと同様に高い精度で曲げひずみを測定し得るかについて, はりの曲げ実験に基づき検証を行う. 幅 49.6mm, 厚さ 18.8mm の軟鋼製のはりを支点間距離 2800mm の単純ばりとして設置し, はり表面に 2mm ピッチのフリンジ画像を印刷した紙製のシールを載荷点から 300mm の位置に貼付する. そのひずみが 1000μ になるまで載荷し, 解像度 4032 画素 $\times$ 3024 画素で撮影する. 実験結果を表2に示す.

表2 実験結果 (μ)

実験番号	正解値	測定値
1	-999.537	-1365.5
2	-999.537	-1190.2
3	-999.537	-1787.8
4	-999.537	-1581.6
5	-999.537	-1473.6
6	-999.537	-1334.0
7	-999.537	-1717.9

いずれの測定においても, 正解値とに比較的大きな差異が認められた. 本実験では紙製シールを用いているが, 貼付時の伸縮抑制が難しく, 精度向上にはシールの材質の工夫など, さらなる改善が必要と考えられる.

4. おわりに

解放区間 4.8m までであれば, サンプリングモアレ法で2点の曲げモーメントを評価した場合でも, 理論上は十分な精度を維持したまま軸力推定が可能であることが分かった. しかし, 本手法をはりの曲げひずみ測定に適用したところ, 大きな測定誤差を得る結果となった. レールの曲げひずみ測定に本手法を適用するには, レール頭頂面に貼付するシールの材質など, さらなる工夫が必要と考えられる.

参考文献

- 1) 元好茂, 青木宣頼, 阿部和久, 田中洋介, 吊上げ式レール軸力測定法を用いた軸力測定試験, 鉄道工学シンポジウム論文集, 15, 120-123, 2011.
- 2) 遠藤一彰, 阿部和久, 紅露一寛, 吊り上げ式レール軸力測定法の改善に関する検討, 鉄道工学シンポジウム集, 21, 75-80, 2017.
- 3) Ri, s., Fujigaki, M. and Morimoto, Y.: Sampling Moiré method for accurate small deformation distribution measurement, Experim. Mech, 50, 501-508, 2010.