第I部門

1. はじめに

橋りょう・橋台・盛土が接続する構造物境界部では各 箇所でレール支持剛性が大きく異なるため、橋台裏で のバラスト軌道の沈下が大きく,軌道保守上の弱点箇 所となることが多い¹⁾. 軌道沈下を抑制するために, 新 設盛土に関する設計標準が整備された他、既存盛土の 補強を検討するための実験や数値解析が進められてき た. ただし, 浮きまくらぎを含めたレール支持剛性のば らつきなどにより,列車通過時における構造物境界部 のレール変位挙動は複雑かつ箇所毎に異なる.近年で は、このような橋りょう・橋台・盛土の列車通過時挙動 を対象に、3台のビデオカメラを用いた画像計測と合成 処理により,橋りょう・橋台・盛土上の広範囲なレール 変位分布を可視化し、複雑なレール挙動を分析する手 法が提案されている2).一方,沈下対策の工種や範囲の 検討では、例えば現状の橋台裏盛土における支持剛性 や浮き量、浮きまくらぎの分布といった定量的な評価 指標が必要となるが、レール変位分布から現状を定量 的に評価する手法は十分に整備されていない.

以上を踏まえ,本研究では,構造物境界部でのレール 支持剛性のばらつきおよび浮きまくらぎが考慮できる 非線形2次元有限要素法(2D-FEM)を構築し,画像計 測より得られた波形²⁾と比較することで,提案手法の妥 当性を検討する.さらに列車通過時における対象箇所 でのレール挙動の現象評価として,レール支持剛性の ばらつきおよび浮き量を定量的に評価する.

大阪ナ	、学大学院工学研究科	学生員	○髙瀬	忠郁
(公財)	鉄道総合技術研究所	正会員	松岡	弘大
大阪ナ	、学大学院工学研究科	正会員	貝戸	清之

2. 支持剛性のばらつき・浮き量を考慮した FEM

図-1に本研究で対象とした構造物境界部のFEMモデ ルを示す.画像計測より得られた波形と比較するため 既往研究²⁾における現地計測箇所の諸元を想定した.荷 重列は図-1を右から左へ走行する8両編成車を想定し, 橋りょうとレールははり要素,レール支持部(軌道パッ ドを含むレール締結装置およびまくらぎ)と橋りょう 支承はばね要素によりそれぞれモデル化する.

なお、構造物境界部に該当するまくらぎ番号-6 から 13 までの 20 締結分を浮きまくらぎ発生箇所と想定し、 非線形ばねを導入している.ただし、今後検討を予定す る逆解析での計算量を抑えるために、本研究では地点*s* において、まくらぎが剛な地盤もしくは橋りょうに接 触するまで (レール鉛直変位 $u_{(s)} <$ 浮き量 $\delta_{(s)}$)を支持剛 性 $k_{1(s)}$,接触後 (レール鉛直変位 $u_{(s)} \geq$ 浮き量 $\delta_{(s)}$)を支 持剛性 $k_{2(s)}$ (≫ $k_{1(s)}$)とした 2 段線形ばねを想定する.

3. 剛性方程式の解法

浮きまくらぎを考慮した非線形ばねとして 2 段線形 ばねを想定する場合,繰返し計算を要さずに剛性方程 式を解くことが可能である.

 1 次剛性k₁のみを考慮した剛性行列K₁を作成し、剛 性方程式から式(1)により外力ベクトルが作用した際の 全節点における仮の変位量x*を算出する.

$$x^* = K_1^{-1}F (1)$$

全節点における仮の変位量**x***のうち,地点s(s= 1,2,...,20)における非線形ばねの両端節点の相対変位



Tadafumi TAKASE, Kodai MATSUOKA and Kiyoyuki KAITO

t.takase@civil.eng.osaka-u.ac.jp

表-1 解析に用いた支持剛性

	浮き + レール支持部(非線形ばね)																					
			橋り	よう			橋台							盛土							レール支持部 (線形ばね)	橋りよう支承(線形ばね)
まくらぎ番号	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	(1)(1)) (0)(10)	(0)(0) (0)(10)
1次剛性k ₁ [×10 ⁵ N/m]	-	-	-	-	-	4.0	-	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	-	-	-	-	-	-	-	-
2次剛性k ₂ [×10 ⁷ N/m]	1.0	0.8	0.3	0.2	0.2	0.2	4.0	1.0	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4	0.4	1.0	3.0	4.0	4.0	1.5	0.8	4.0	1.0×10^{4}
浮き量 δ [mm]	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0	0.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-	-

 $\delta_{(s)}^*$ と浮き量 $\delta_{(s)}$ との比率 $r_{(s)}$ を式(2)より定義する.

$$r_{(s)} = \delta^*_{(s)} / \delta_{(s)} \tag{2}$$

地点*s*における非線形ばねが 1 次剛性領域に留まる ($r_{(s)} < 1$)もしくは 2 次剛性領域に達する ($r_{(s)} \ge 1$), および $r_{(s)}$ の大小関係 ($r_{(a)} < \cdots < r_{(\beta)} < r_{(\gamma)}$)を用いて, 全節点の変位量*x*'が式(3)より計算できる.

$$\mathbf{x}' = \frac{\frac{F}{r_{(\gamma)}}}{K_{\text{case.1}}} + \frac{\frac{F}{r_{(\beta)}} - \frac{F}{r_{(\gamma)}}}{K_{\text{case.2}}} + \dots + \frac{F - \frac{F}{r_{(\alpha)}}}{K_{\text{case.20}}}$$
(3)

ここで, *K*_{case.n}は各地点における非線形ばねの状況(1) 次剛性領域もしくは 2 次剛性領域)によって定まる剛 性行列である.

4. 適用結果

表-1 に示す支持剛性を提案手法に適用する. 本研究 では橋りょうおよび橋台裏の2 次剛性を相対的に低く 設定し,まくらぎ番号-1および1から7には浮き量2mm を導入した. 図-2 に荷重列が橋台裏に位置する場合、 および橋りょう上に位置する場合のレール変位の空間 分布を示す. 図中の青矢印は荷重列の位置を表してい る. また,図-3 に橋台裏においてレール挙動が大きい 地点(まくらぎ番号4)でのレール変位を示す、画像計 測より得られた波形を灰色, レール支持剛性のばらつ きおよび浮き量を考慮した 2D-FEM より算出した波形 を橙色で示しており、これらは概ね一致するため、提案 手法は対象箇所でのレール挙動を再現可能であると考 えられる.橋台裏でバラスト軌道が大きく沈下する点, 荷重列が橋りょう上に位置する場合に支持剛性の高い 橋台部がシーソーの支点のように作用して橋台裏のレ ールで上側変位が生じる点²⁾も再現できており、対象筒 所では設定した諸元(表-1)に近い支持剛性のばらつき および浮き量が発生していると予想される.

5. おわりに

本研究では構造物境界部において浮きまくらぎを含めたレール支持剛性のばらつきが考慮できる非線形 2D-FEM を構築した. 画像計測より得られた波形と比較 することで,列車通過時における構造物境界部のレー





(b) 荷重列が橋りょう上に位置する場合 図-2 構造物境界部に敷設されるレール変位の空間分布



図-3 まくらぎ番号4直上でのレール変位

ル変位挙動が再現可能であると分かり,また,対象箇所 でのレール支持剛性のばらつきや浮きまくらぎ発生状 況を検討した.今後,本研究で設定した諸元を変更する ことで橋台裏でのバラスト軌道の沈下対策を検討する 他,レール支持剛性や浮き量に関する逆解析手法の構 築を検討している.

【参考文献】

- 石田誠,三浦重,河野昭子:橋台裏盛土沈下による軌道 変形特性と車両走行特性,鉄道総研報告, Vol.12, No.3, pp.41-46, 1998.
- 2) 保木本晟也,松岡弘大,服部紘司,矢野貴洋,四井陽貴: 複数カメラを利用した列車通過時の橋台裏レール変位 分布の画像計測,鉄道工学シンポジウム論文集,Vol.28, No.1, pp.92-99, 2024.