

表-1 解析に用いた支持剛性

まくらぎ番号	浮き＋レール支持部（非線形ばね）																		レール支持部 （線形ばね）	橋りょう支承 （線形ばね）			
	橋りょう						橋台						盛土										
	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11			12	13	
1次剛性 k_1 [$\times 10^5$ N/m]	-	-	-	-	-	4.0	-	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2次剛性 k_2 [$\times 10^7$ 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 ($r_{(s)} \geq 1$)、および $r_{(s)}$ の大小関係 ($r_{(\alpha)} < \dots < r_{(\beta)} < r_{(\gamma)}$) を用いて、全節点の変位量 $\mathbf{x}'$ が式(3)より計算できる。

$$\mathbf{x}' = \frac{\mathbf{F}}{K_{\text{case.1}}} + \frac{\mathbf{F} - \mathbf{F}}{K_{\text{case.2}}} + \dots + \frac{\mathbf{F} - \mathbf{F}}{K_{\text{case.20}}} \tag{3}$$

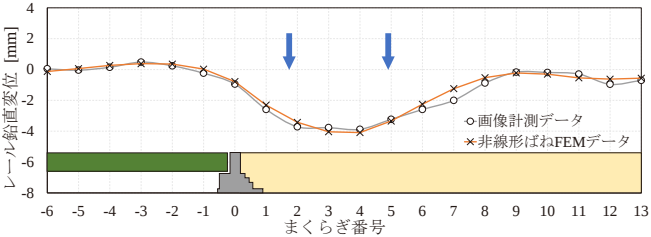
ここで、 $K_{\text{case.}n}$ は各地点における非線形ばねの状況 (1 次剛性領域もしくは 2 次剛性領域) によって定まる剛性行列である。

4. 適用結果

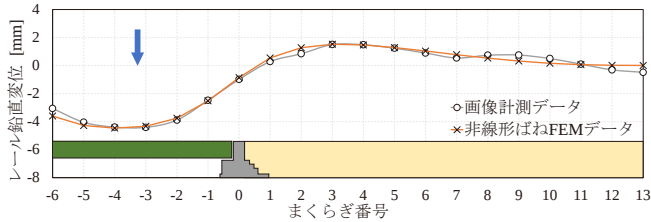
表-1 に示す支持剛性を提案手法に適用する。本研究では橋りょうおよび橋台裏の 2 次剛性を相対的に低く設定し、まくらぎ番号-1および1から7には浮き量2mmを導入した。図-2 に荷重列が橋台裏に位置する場合、および橋りょう上に位置する場合のレール変位の空間分布を示す。図中の青矢印は荷重列の位置を表している。また、図-3 に橋台裏においてレール挙動が大きい地点 (まくらぎ番号 4) でのレール変位を示す。画像計測より得られた波形を灰色、レール支持剛性のばらつきおよび浮き量を考慮した 2D-FEM より算出した波形を橙色で示しており、これらは概ね一致するため、提案手法は対象箇所でのレール挙動を再現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、対象箇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ル



(a) 荷重列が橋台裏に位置する場合



(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

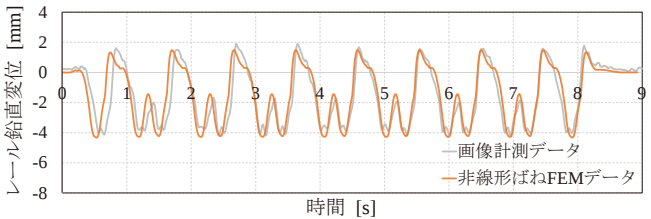


図-3 まくらぎ番号 4 直上でのレール変位

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】

1) 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.