

文章编号:1005-0523(2023)02-0009-07



# 余弦型路基沉降对纵连板式无砟轨道变形与层间接触性状的影响

冯玉林<sup>1,2</sup>, 侯宇<sup>1</sup>, 何彬彬<sup>1,2</sup>, 周旺保<sup>3</sup>, 麻宏强<sup>1</sup>

(1. 华东交通大学土木建筑学院, 江西 南昌 330013; 2. 华东交通大学轨道交通基础设施性能监测与保障国家重点实验室, 江西 南昌 330013; 3. 中南大学土木工程学院, 湖南 长沙 410075)

**摘要:**基于前期开发的高速铁路基础变形诱发轨道结构变形与层间接触性状演变的通用表征模型,引入余弦型路基沉降描述函数,引入用以刻画轨道-路基间接触非线性的 Heaviside 函数,推导余弦型路基沉降下纵连板式无砟轨道各层结构的变形方程,利用渐进性接近法求解含接触非线性的超静定方程,进而分析余弦型路基沉降对轨道各层结构变形和层间接触性状演变的影响规律。结果表明:在余弦型路基沉降区域内,轨道随路基沉降发生“跟随性”变形,当路基沉降波长一定时,轨道下沉和上拱均随路基沉降幅值的增加而增大,当沉降幅值一定时,轨道下沉随路基沉降波长的增加而增大,但上拱却减小;轨道-路基间的脱空区域及轨道的受力曲线呈左右对称,轨道整体刚度影响脱空长度和高度;当路基沉降波长为 10 m 时,随路基沉降幅值的增加,脱空高度和长度增长的同时,还会整体向远离沉降区方向“偏移”;当路基沉降幅值为 10 mm 时,需要重点关注沉降波长小于 20 m 的不均匀沉降。

**关键词:**余弦型路基沉降;表征模型;轨道变形;接触性状

中图分类号:U216.41

文献标志码:A

本文引用格式:冯玉林,侯宇,何彬彬,等.余弦型路基沉降对纵连板式无砟轨道变形与层间接触性状的影响[J].华东交通大学学报,2023,40(2):9-15.

DOI:10.16749/j.cnki.jecjtu.20230330.014

## Influence of Cosine Subgrade Settlement on Deformation and Inter-layer Interface State of Longitudinally Connected Ballastless Track

Feng Yulin<sup>1,2</sup>, Hou Yu<sup>1</sup>, He Binbin<sup>1,2</sup>, Zhou Wangbao<sup>3</sup>, Ma Hongqiang<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China;

2. State Key Laboratory of Performance Monitoring and Protecting of Rail Transit Infrastructure, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 3. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China)

**Abstract:**Based on the pre-development general characterization model of track structure deformation and the evolution of interlayer interface state induced by the deformation of high-speed railway foundation, the description function of cosine subgrade settlement was implanted and the Heaviside function was introduced to describe the contact nonlinearity between track and subgrade, so that the deformation equation of each layer of longitudinally connected ballastless track under cosine subgrade settlement was derived. The progressive approximation method was used to solve hyperstatic equation with contact nonlinearity, and the influence law of cosine subgrade settlement on the track structure deformation of each layer and the evolution of interlayer interface state was analyzed. Results indicate that in the cosine subgrade settlement area, the track deforms accordingly with the

收稿日期:2022-06-21

基金项目:国家自然科学基金项目(52268074);江西省自然科学基金项目(20224BAB214073);江西省教育厅科学技术研究项目(GJJ2200646,GJJ2200675)

subgrade settlement. When the subgrade settlement wavelength is constant, the track settlement and heaving increase with the increase of the subgrade settlement amplitude. When the settlement amplitude is constant, the track settlement increases with the increase of the subgrade settlement wavelength, but the track heaving decreases. The void area between track-subgrade and the track force curve are symmetrical, and the track overall stiffness affects the void length and height. When the subgrade settlement wavelength is 10 m, with the increase of the subgrade settlement amplitude, the void height and length increase, and it will also shift away from the settlement area as a whole. When the subgrade settlement amplitude is 10 mm, it is necessary to focus on the uneven settlement with settlement wavelength less than 20 m.

**Key words:** cosine subgrade settlement; representational mode; track deformation; interface state

**Citation format:** FENG Y L, HOU Y, HE B B, et al. Influence of cosine subgrade settlement on deformation and interlayer interface state of longitudinally connected ballastless track[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2023, 40(2): 9-15.

纵连板式无砟轨道连锁件在提高轨道系统整体性的同时,又令其对基础结构的变形尤为敏感,一旦基础发生变形,线路将不可避免地发生轨道不平顺<sup>[1]</sup>。当轨道-路基间产生不协调变形时,又会使两者之间产生离缝甚至大范围脱空,在列车反复荷载下,大范围脱空会加重轨道系统的疲劳损伤,影响行车稳定性,甚至安全性。

目前,结合理论模型的角度,很多学者已经开展了基础结构变形对无砟轨道结构变形影响的研究。陈兆玮等<sup>[2-4]</sup>以简支梁为研究对象,分别建立了单元板式、纵连板式无砟轨道系统在桥墩沉降作用下的映射解析模型。Gou等<sup>[5-6]</sup>建立了考虑层间接触非线性和联结失效长时影响的桥梁-轨道变形映射关系,分析了桥墩沉降、梁体错台及梁端转角对无砟轨道结构变形的影响。Feng等<sup>[7-9]</sup>研究了高铁连续梁竖向、横向变形对轨面几何形态变化及层间协调关系的影响。Lai等<sup>[10-13]</sup>推导了高速铁路 CRTS I型、CRTS II型和 CRTS III型板式无砟轨道桥梁变形与轨道几何形状之间的解析关系。郭宇等<sup>[14-15]</sup>提出了地基不均匀沉降与无砟轨道轨面变形间的映射关系,研究了地基沉降幅值和沉降波长对轨面变形的影响。赵国堂等<sup>[16-17]</sup>研究了路基冻胀下无砟轨道的变形特征,并提出了相应的确定路基冻胀管理标准的方法。辛莉峰等<sup>[18-19]</sup>建立三维车-轨-桥耦合计算模型,研究了轨道不平顺对桥梁动力响应的影响。现有的研究多聚焦于基础变形对轨道结构受力、变形趋势的预测,对路基不均匀沉降引起的轨道-路基间非连续性联结状态的研究较少,而关于两者之间层间接触力与接触状态的联系更是鲜有报道。

本文结合国内高速铁路土质路基上的纵连板式无砟轨道结构特点,基于前期开发的高速铁路基础变形诱发轨道结构变形与层间接触性状演变的通用表征模型,建立轨道-路基解析模型,研究路基不均匀沉降波长和幅值对轨道各层结构变形的影响规律,并进一步揭示轨道-路基系统层间接触力与接触性状的联系与演变规律。

## 1 余弦型路基沉降下轨道各层结构变形与层间接触性状演变的表征模型

目前,常见的路基不均匀沉降型式有折角型、错台型、路基冻胀及余弦型等路基不均匀沉降模式,均可以采用函数表达式进行模拟。本文选取余弦型路基不均匀沉降模式,见图 1。

如图 1 所示,当路基发生余弦型沉降后,纵连板式无砟轨道系统因自重而产生跟随性竖向变形,引起轨面几何不平顺。同时,因为轨道结构具有极高的刚度和整体性,使轨道系统与路基系统之间出现变形差异,从而导致两者之间在路基沉降区域一定范围内产生脱空区域。

通过上述分析,基于前期开发的高铁基础变形诱发轨道结构变形与层间接触性状演变的通用表征模型<sup>[20]</sup>,引入余弦型路基不均匀沉降描述函数,可以表示为

$$y_{iv} = \frac{S}{2} \left( 1 + \cos \frac{2\pi l_{iv}}{L} \right) \frac{S}{L} \quad (1)$$

式中: $y_{iv}$ 为第*i*个接触弹簧位置处的路基位移; $S$ 为不均匀沉降幅值; $L$ 为不均匀沉降波长; $l_{iv}$ 为路基上第*i*个接触弹簧位置。

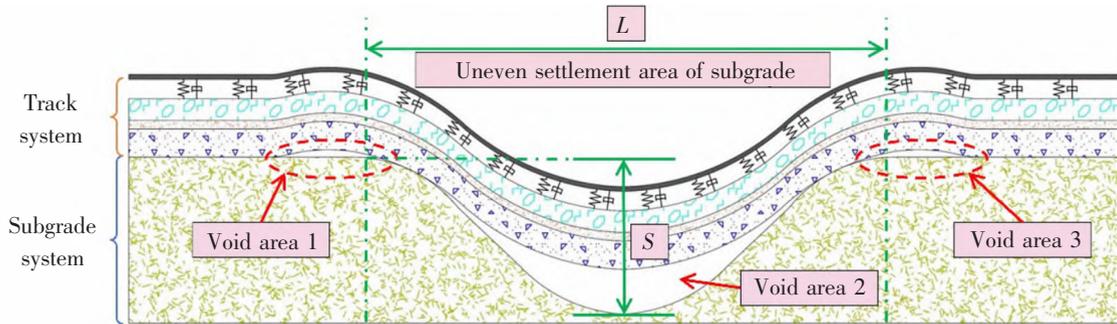


图 1 余弦型路基沉降描述曲线及其诱发纵连板式无砟轨道-路基脱空示意图

Fig.1 Diagram of description curve of cosine subgrade settlement and its induced longitudinally connected ballastless track-subgrade void

高铁基础变形诱发轨道结构变形与层间接触性状演变的通用表征模型如式所示

$$\begin{cases} V_r = AF + BQ_r \\ V_s = C_1F + C_2P + DQ_s \\ V_p = H_1F + H_2N + IQ_p \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $V_r, V_s, V_p$  分别代表钢轨、轨道板和底座板的变形矩阵;  $A, B, C_1, C_2, D, H_1, H_2, I$  分别为轨道各层结构位移的影响矩阵;  $Q_r, Q_s, Q_p$  分别为轨道各层结构的自重矩阵;  $F, P, N$  分别为轨道各层间弹簧力矩阵, 可以表示为

$$\begin{cases} F = k_c(V_s - V_r) \\ P = k_{ca}(V_p - V_s) \\ N = k_p(V_b - V_p) \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $k_c, k_{ca}, k_p$  分别为扣件弹簧, 砂浆弹簧及接触弹簧刚度矩阵;  $V_b$  为路基不均匀沉降位移矩阵。

联立求解式(2)式(3), 轨道各层结构变形可以表示为式

$$\begin{bmatrix} V_r \\ V_s \\ V_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E + k_c A & -k_c A & 0 \\ k_c C_1 & E - k_c C_1 + k_c C_2 & -k_c C_2 \\ 0 & k_c H_1 & E - k_c H_1 + k_p H_2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} BQ_r \\ DQ_s \\ k_p H_2(V_b) + IQ_p \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中:  $E$  为单位矩阵。

此外, 由于轨道系统与路基系统之间存在接触非线性, 无法直接求解。引入 Heaviside 函数形成无拉力温克勒梁, 用于描述轨道系统与路基系统之间的非线性接触关系, 如

$$T = \begin{cases} 1, y_{up} - y_{db} > 0 \\ 0, y_{up} - y_{db} \leq 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $T$  为接触状态矩阵;  $y_{up}, y_{db}$  分别为轨道系统下层与路基系统上层结构的挠度。利用渐进性接近法求解<sup>[19]</sup>。

当路基不均匀沉降波长为 10 m, 沉降幅值为

5 mm 时, 将解析模型计算结果与文献[20]及有限元模型的结果进行对比验证。如图 2 所示, 解析模型计算的结果与文献及有限元模型的计算结果吻合良好。说明引入路基不均匀沉降描述函数后, 通用表征模型依然适用。

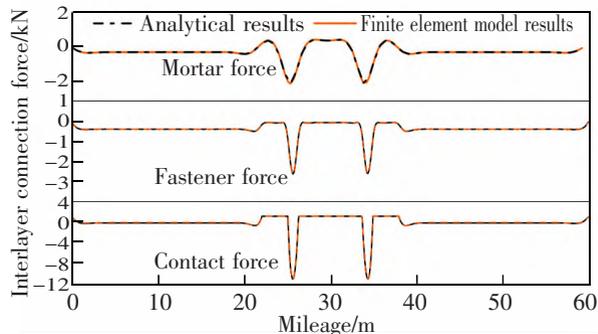


图 2 模型验证

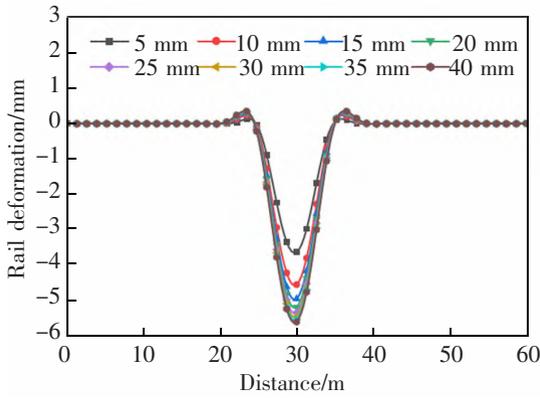
Fig.2 Model verification

## 2 余弦型路基沉降对轨道各层结构变形的影响

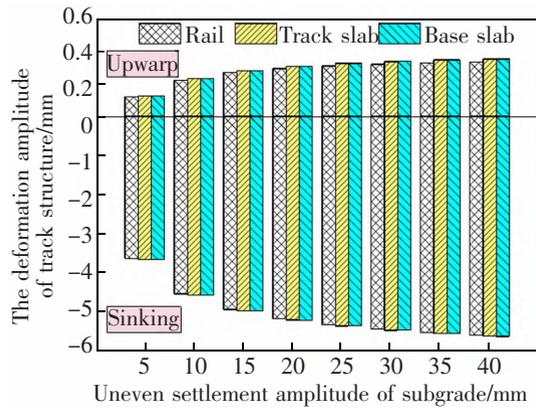
### 2.1 沉降幅值对结构变形的影响

当路基不均匀沉降波长为 10 m, 沉降幅值从 5 mm 到 40 mm 等量增加时, 不同沉降幅值下的轨道结构几何变形特征如图 3 所示。

由图 3 可知, 在路基不均匀沉降区域内, 钢轨随路基发生跟随性向下变形, 几何变形型式同路基不均匀沉降相同, 表现为余弦型。在沉降区域外, 钢轨在沉降区域边缘受到向上支撑力, 发生上拱变形, 使钢轨变形波长向两侧扩散, 扩散速度随路基沉降幅值的增加呈现出逐渐减小的非线性变化趋势。路基沉降幅值从 5 mm 到 40 mm 等量增加的过程中, 轨道各层结构变形逐渐增大, 但增长速度逐渐减小, 上拱变形增长速度相对于下沉变



(a) Rail deformation



(b) Deformation amplitude of track structure

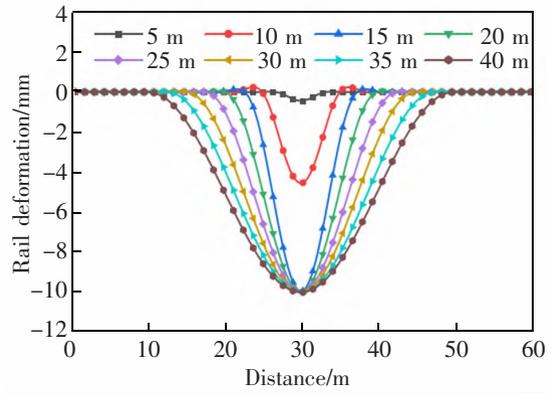
图3 不同沉降幅值下的轨道结构几何变形特征  
Fig.3 Geometric deformation characteristics of track structure under different settlement amplitudes

形较为平缓。整体上看,轨道系统下沉变形幅值小于路基沉降幅值。当路基沉降波长为10 m时,不同沉降幅值下的轨道-路基间会产生不同程度的脱空区域,沉降幅值的大小决定脱空区域的长度与高度。

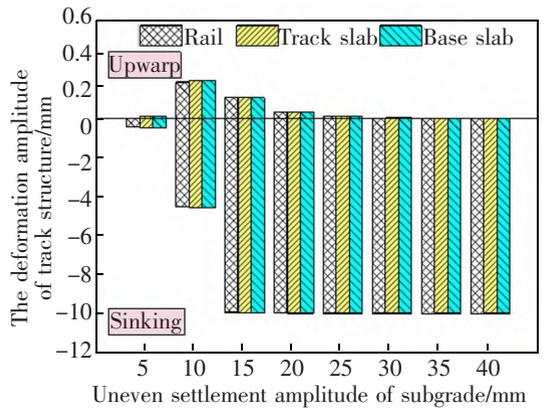
## 2.2 沉降波长对结构变形的影响

当路基不均匀沉降幅值为10 mm,沉降波长从5 m到40 m等量增加时,不同沉降波长下的轨道结构几何变形特征如图4所示。

由图4可知,在路基不均匀沉降幅值为10 mm的情况下,轨道结构的下沉变形随路基不均匀沉降波长的增加而增大,上拱变形随沉降波长的增加而减小。当沉降波长等于5,10 m时,轨道各层结构下沉幅值远小于路基沉降幅值,这意味着该情况下轨道系统与路基系统间会产生较大脱空,对轨道结构受力和列车运行安全造成不利影响。在路基不均匀沉降区域外侧,轨道结构上拱幅值在沉降波长为10 m时最大,下沉幅值在沉降波长大于20 m时稳



(a) Rail deformation



(b) Deformation amplitude of track structure

图4 不同沉降波长下的轨道结构几何变形特征  
Fig.4 Geometric deformation characteristics of track structure under different settlement wavelengths

定在10 mm左右。整体上看,当路基波长大于30 m时,轨道变形量与路基沉降值基本达成一致,不再受路基沉降波长影响。

## 3 余弦型路基沉降对轨道-路基层间接触性状的影响

当路基发生不均匀沉降时,轨道-路基间会产生相对位移差,使得两者之间的接触性状发生改变,从而引起层间接触力出现突变。以路基发生10 m/10 mm(波长/沉降)不均匀沉降为例,分析轨道-路基间接触状态的变化规律。图5为轨道-路基间位移差及层间接触力特性。其中,接触力受拉为负,受压为正。

由图5可知,轨道-路基间接触性状的变化只发生在路基不均匀沉降区域及其两侧小范围内,接触性状改变类型可分为分离脱空和挤压接触。其中,脱空区域主要产生在路基沉降不均匀区域中部和沉降区外部两侧,在受力上表现为接触力

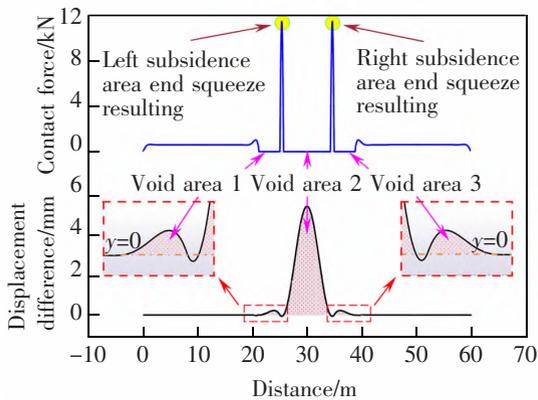


图 5 轨道-路基间的位移差及层间接触力特性

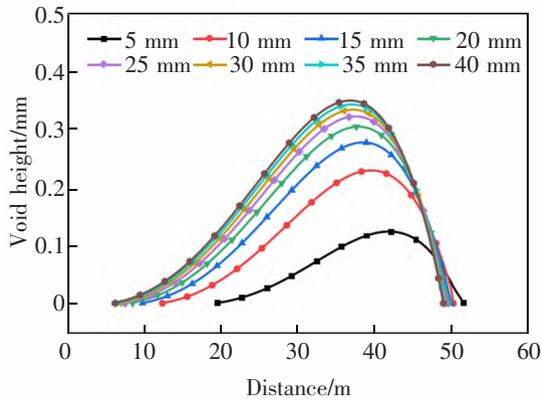
Fig.5 Displacement difference between track-subgrade and interlayer contact force characteristics

为 0。接触区域主要存在与各脱空区域两侧,变形状态表现为轨道向下变形量大于路基沉降值;因此,轨道在该区域受力状态发生突变,产生较大向上支撑力。整体而言,轨道-路基间的脱空区域及轨道的受力曲线呈左右对称特征。在靠近沉降中心的接触区域,轨道-路基间的位移差较大,相应产生的接触力也较大。在远离沉降中心的接触区域,轨道-路基间的位移差较小,相应产生的接触力也较小。

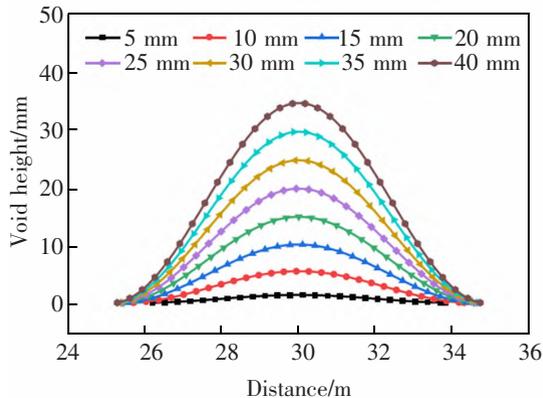
3.1 沉降幅值对层间接触性状影响

取路基沉降波长为 10 m,使沉降幅值从 5 mm 到 40 mm 等量增加,研究沉降幅值对轨道-路基接触性状的影响,由上述分析可知:脱空区域呈左右对称特征,故只针对脱空区域 1 和脱空区域 2 进行分析。不同沉降幅值下轨道-路基间的脱空量如图 6 所示。

由图 6 可知,随路基沉降幅值的增加,脱空区域 1 在脱空高度和长度增长的同时,区域整体逐渐向远离沉降区域的方向“偏移”。但在路基沉降幅值增加的过程中,脱空长度和高度的增长幅度及脱空区域的“偏移”速度呈现出逐渐减小的趋势。脱空区域 2 的脱空长度和高度在随路基沉降幅值的增加,分别表现为向外侧扩散和逐渐增大,不同的是,脱空长度的扩散速度在路基沉降幅值增加的过程中逐渐衰弱,而脱空高度的增大速度却在逐渐提高。整体而言,轨道的整体刚度影响着脱空区域的脱空长度发展。在其刚度可承受的范围,变形会达到一个最大值,超过这个值后,轨道的变形将不会有很大变化,从而使脱空长度发展速度有所减缓。对于脱空高度,脱空



(a) Void area 1



(b) Void area 2

图 6 不同沉降幅值下轨道-路基间的脱空值

Fig.6 Void value between track-subgrade under different settlement amplitudes

区域 1 同样主要受轨道整体刚度影响,其发展速度与脱空长度具有相同规律。而脱空区域 2 的脱空高度主要由路基沉降幅值决定,故其发展速度逐渐提高。

3.2 沉降波长对层间接触性状的影响

取路基沉降幅值为 10 mm,使沉降波长从 5 m 到 40 m 等量增加,研究沉降波长对轨道-路基间接触性状的影响。不同沉降波长下轨道-路基间的脱空量如图 7 所示。

由图 7 可知,当沉降波长大于 5 m 时,脱空区域 1 的脱空高度和长度随沉降波长的增减而有所减小,直至大于 35 m 后,轨道-路基间的变形逐渐一致,脱空区域随之消失。值得注意的是,当沉降波长从 5 m 增加到 10 m 的过程中,脱空区域 1 的脱空高度和长度逐渐增大,这是因为沉降波长相对较小时,沉降区域内的轨道下沉变形相对较小,从而引起沉降区域外的轨道上拱变形也相对较小。在沉降区域 2,随沉降波长的增加,脱空区域的高度和长

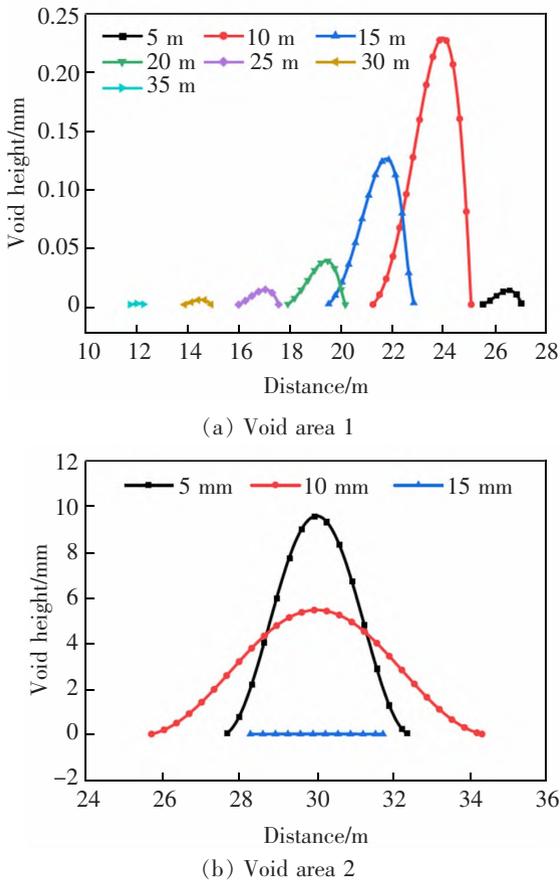


图7 不同沉降波长下轨道-路基间的脱空值

Fig.7 Void value between track-subgrade under different settlement wavelengths

度随之减小。这是因为在沉降波长增加的过程中,轨道变形曲线与路基沉降曲线之间的跟随性逐渐变好,使两者之间的脱空区域逐渐减小直至消失。整体而言,当路基不均匀沉降幅值为10 mm时,需要重点关注沉降波长小于20 m的短波不均匀沉降。

## 4 结论

1) 笔者前期开发的高速铁路基础变形诱发轨道结构变形与层间接触性状演变的通用表征模型,通过引入路基不均匀沉降描述函数后,依然适用于路基不均匀沉降的工况分析中,说明通用表征模型具有广泛的适用性。

2) 在路基不均匀沉降区域内,轨道随路基沉降发生跟随性变形;在沉降区域外,轨道出现上拱变形,使轨道变形波长向两侧扩散。轨道变形和波长扩散程度由路基沉降幅值、波长综合决定。

3) 当路基不均匀沉降波长一定时,轨道下沉和上拱幅值随路基沉降幅值的增加而增大。增大幅度

在沉降幅值增大的过程中表现为逐渐衰减的趋势;当沉降幅值一定时,轨道下沉变形随路基沉降波长的增加而增大,但上拱变形却随路基沉降波长的增加而减小。

4) 轨道整体刚度影响着脱空区域的脱空长度和高度,在其刚度可承受的范围外,轨道变形将不会有较大变化,从而使脱空长度和高度发展速度有所减缓。

5) 当路基沉降波长为10 m时,随路基沉降幅值的增加,脱空区域1在脱空高度和长度增长的同时,区域整体逐渐向远离沉降区域的方向“偏移”。当路基沉降幅值为10 mm时,需要重点关注沉降波长小于20 m的短波不均匀沉降。

## 参考文献:

- [1] 秦晓光,杨龙才. 灰色预测在高速铁路路基沉降预测中的应用[J]. 华东交通大学学报,2011,28(5):88-92.  
QIN X G, YANG L C. Application of Grey Prediction in Settlement Prediction of High-speed Railway[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2011, 28(5): 88-92.
- [2] 陈兆玮,孙宇,翟婉明. 高速铁路桥墩沉降与钢轨变形的映射关系(I)[J]. 中国科学:技术科学,2014,44(7):770-777.  
CHEN Z W, SUN Y, ZHAI W M. Mapping relationship between pier settlement and rail deformation of high-speed railways ( I ) [J]. Scientia Sinica: Technologica, 2014, 44(7): 770-777.
- [3] 陈兆玮,孙宇,翟婉明. 高速铁路桥墩沉降与钢轨变形的映射关系(II)[J]. 中国科学:技术科学,2014(7):778-785.  
CHEN Z W, SUN Y, ZHAI W M. Mapping relationship between pier settlement and rail deformation of high-speed railways-part ( II ) [J]. Scientia Sinica: Technologica, 2014, 44(7): 778-785.
- [4] CHEN Z W. Relationship between track stiffness and dynamic performance of vehicle-track-bridge system[J]. Vehicle System Dynamics, 2021, 59(12): 1825-1843.
- [5] GOU H Y, RAN Z W, YANG L C, et al. Mapping vertical bridge deformations to track geometry for high-speed railway[J]. Steel and Composite Structures, 2019, 32(4): 467-478.
- [6] GOU H Y, YANG L C, LENG D, et al. Effect of bridge lateral deformation on track geometry of high-speed railway [J]. Steel and Composite Structures, 2018, 29(2): 219-229.
- [7] FENG Y L, JIANG L Z, ZHOU W B, et al. An analytical solution to the mapping relationship between bridge structures vertical deformation and rail deformation of high-speed railway[J]. Steel and Composite Structures, 2019, 33(2): 209-224.

- [8] 蒋丽忠,冯玉林,周旺保,等. 高铁连续梁桥横向变形与轨面几何形态变化的映射关系研究[J]. 建筑结构学报,2021,42(4):215-222.  
JIANG L Z,FENG Y L,ZHOU W B,et al. Study on mapping relationship between continuous girder bridge transverse deformation and rail geometric changes of high-speed railway[J]. Journal of Building Structures. 2021,42(4):215-222.
- [9] 冯玉林,蒋丽忠,陈梦成,等. 连续梁桥边墩不均匀沉降下轨道层间变形协调关系及动力学应用[J]. 工程力学,2021,38(4):179-190.  
FENG Y L,JIANG L Z,CHEN M C,et al. Deformation compatibility relationship of track Interlayer with uneven settlement of side pier of continuous girder bridge and its dynamic application[J]. Engineering Mechanics, 2021, 38(4):179-190.
- [10] LAI Z P,JIANG L Z,LIU X,et al. Analytical investigation on the geometry of longitudinal continuous track in high-speed rail corresponding to lateral bridge deformation[J]. Construction and Building Materials,2021,268:121064.
- [11] JIANG L Z,LIU L L,ZHOU W B,et al. Mapped relationships between pier settlement and rail deformation of bridges with CRTS III SBT[J]. Steel and Composite Structures,2020,36(4):481-492.
- [12] JIANG L Z,ZHENG L,FENG Y L,et al. Mapping the relationship between the structural deformation of a simply supported beam bridge and rail deformation in high-speed railways[J]. Journal of Rail and Rapid Transit,2020,234(10):1081-1092.
- [13] 郭宇,高建敏,孙宇,等. 板式无砟轨道轨面变形与路基沉降的映射关系[J]. 西南交通大学学报,2017,52(6):1139-1147.  
GUO Y,GAO J M,SUN Y,et al. Mapping relationship between rail deflection of slab track and subgrade settlement [J]. Journal of Southwest Jiaotong University,2017,52(6):1139-1147.
- [14] 郭宇,高建敏,孙宇,等. 路基沉降与双块式无砟轨道轨面几何变形的映射关系[J]. 铁道学报,2016,38(9):92-100.  
GUO Y,GAO J M,SUN Y,et al. Mapping relationship between subgrade settlement and rail deflection of the double-block ballastless track[J]. Journal of the China Railway Society, 2016,38(9):92-100.
- [15] 赵国堂. 严寒地区高速铁路无砟轨道路基冻胀管理标准的研究[J]. 铁道学报,2016,38(3):1-8.  
ZHAO G T. Study on management standard of frost heaving of ballastless track subgrade on high-speed railway in severe cold regions[J]. Journal of the China Railway Society, 2016,38(3):1-8.
- [16] 赵国堂,刘秀波,高亮,等. 哈大高速铁路路基冻胀区轨道不平顺特征分析[J]. 铁道学报,2016,38(7):105-109.  
ZHAO G T,LIU X B,GAO L,et al. Characteristic analysis of track irregularity in subgrade frost heave area of harbin-

dalian high-speed railway[J]. Journal of the China Railway Society,2016,38(7):105-109.

- [17] 辛莉峰,李小珍,肖林,等. 轨道不平顺随机性对高速铁路桥梁动力响应的影响[J]. 铁道学报. 2021,43(4):150-157.  
XIN L F,LI X Z,XIAO L,et al. Effect of stochastic track irregularity on dynamic response of high-speed railway bridges[J]. Journal of the China Railway Society, 2021,43(4):150-157.
- [18] 辛莉峰,李小珍,朱艳. 基于 eFAST 方法的车—线—桥耦合系统全局敏感性分析[J]. 中国铁道科学,2019,40(4):46-51.  
XIN L F,LI X Z,ZHU Y,et al. Global sensitivity analysis of vehicle-track-bridge coupling system based on EFAST method[J]. China Railway Science,2019,40(4):46-51.
- [19] 冯玉林,侯宇,蒋丽忠,等. 基础变形诱发无砟轨道-桥梁系统关键构件变形累积与刚度突变的轨面解析表征[J]. 土木工程学报,2023,56(3):44-57.  
FENG Y L,HOU Y,JIANG L Z,et al. Rail surface analytical representation of deformation accumulation and stiffness mutation of key components in ballastless track-bridge system induced by foundation deformation[J]. China Civil Engineering Journal,2023,56(3):44-57.
- [20] 郭宇. 高速铁路路基不均匀沉降及其演化对车辆-轨道耦合系统力学性能的影响[D]. 成都:西南交通大学,2018.  
GUO Y. Effects of differential subgrade settlement and its evolution in high-speed railways on mechanical performance of vehicle-track coupled system[D]. Chengdu:Southwest Jiaotong University,2018.



第一作者:冯玉林(1990—),男,博士,讲师,研究方向为高速铁路列车-轨道-桥梁损伤映射,地震下高速列车走行安全。  
E-mail:fengyulin@ecjtu.edu.cn。



通信作者:何彬彬(1990—),女,博士,讲师,研究方向为岩土及交通工程。E-mail:hebinbin@lzb.ac.cn。