

自重荷载下非均匀支撑板式无砟轨道静态响应

蒋红光¹,刘舜¹,李宜欣¹,李昕亮¹,薛志超²,姚占勇^{1†}

(1. 山东大学 齐鲁交通学院,山东 济南 250002;2. 山东高速集团有限公司,山东 济南 250098)

摘要:针对高速铁路路基不均匀沉降诱发的板式无砟轨道几何形态和应力状态恶化问题,建立了高速铁路 CRTSII 型板式无砟轨道-路基三维有限元模型,模拟了 64 种路基不均匀沉降组合(波长 5~40 m,波幅 5~40 mm),提出了基于混凝土底座柔度的形态映射和应力水平定量表征方法.研究表明,轨道结构的形态映射特征主要由混凝土底座柔度决定,在沉降波长小于 15 m、或者波长在 15~20 m 之间且沉降幅值大于 15 mm 时,轨道结构与路基因变形不协调而出现脱离.轨道结构变形量的增加会导致混凝土结构附加拉应力和路基接触应力的增大,且易接近或超过相应的强度允许值而产生损伤破坏.同时,增加混凝土底座的模量和厚度,对提高轨面几何平顺性的效果并不显著,反而会增大结构自身的拉应力和路基接触应力.

关键词:高速铁路;路基不均匀沉降;柔度;几何形态;附加应力

中图分类号:U213.2

文献标志码:A

Static Responses of Unevenly Supported Ballastless Track under Self-weight Loads

JIANG Hongguang¹, LIU Shun¹, LI Yixin¹, LI Xinliang¹, XUE Zhichao², YAO Zhanyong^{1†}

(1. School of Qilu Transportation, Shandong University, Jinan 250002, China;

2. Shandong Hi-speed Group Engineering Detection Co Ltd, Jinan 250098, China)

Abstract: To evaluate the deterioration problem of geometry and stress states for the ballastless track caused by the uneven subgrade settlement of high-speed railway, a 3D FEM model of the CRTS II type ballastless track-subgrade system was established in this paper. A total of 64 types of differential settlements were simulated (with wavelengths of 5~40 m and amplitudes of 5~40 mm). Based on the flexibility of the concrete base, quantitatively characterizing method for the geometry mapping and stress level of the track structure was proposed. The results show that the mapping characteristics of the track structure are mainly determined by the flexibility of the concrete base. When the settlement wavelength is less than 15 m or the wavelength is between 15~20 m with the settlement amplitude greater than 15 mm, the subgrade and track are separated due to uncoordinated deformation. The increase of the track structure deformation leads to the development of additional tension stresses in the concrete structure and the subgrade contact stresses, which are prone to approach or exceed their allowable strength and results in damaged failure.

* 收稿日期:2020-09-06

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51608306), National Natural Science Foundation of China(51608306); 中国博士后科学基金资助项目(2016M590636), China Postdoctoral Science Foundation(2016M590636); 山东大学青年学者未来计划资助项目(2019WLJH60), Young Scholar Future Plan Foundation of Shandong University (2019WLJH60); 山东省交通厅科技发展计划资助项目(2019B47_1), Shandong Transportation Science and Technology Foundation(2019B47_1)

作者简介:蒋红光(1985—),男,山东临沂人,山东大学副教授,博士

† 通信联系人, E-mail: zhanyong-yao@sdu.edu.cn

Meanwhile, an increase of the modulus and thickness of the concrete base is not significant for improving the smoothness of the rail surface. On the contrary, it increases the track tensile stress and the subgrade contact stress.

Key words: high-speed railway; subgrade differential settlement; flexibility; geometry; additional stress

经过 10 多年的快速发展,我国已成为世界上高速铁路规模最大、运营速度最高的国家。列车的高速运行对轨道的平顺性提出了非常严格的要求,而路基作为轨道的重要支撑结构,需要为轨道提供平顺的几何形状。但是在实际工程中,路基往往会产生不均匀沉降^[1-2],考虑到扣件系统高度的调节极限,我国高铁设计规范要求普通路基段 20 m 内的不均匀沉降不得超过 15 mm。在自重荷载作用下,非均匀路基支撑将导致轨道结构附加应力增大,影响交通基础设施的耐久性。由于板式无砟轨道的整体刚度非常大,其轨面变形并非与路基不均匀沉降完全一致,轨下结构损伤往往具有很强的隐蔽性,一旦发展到轨道结构应力损坏,维修和更换难度非常大,因此需要充分评估非均匀支撑下的板式无砟轨道几何形态和力学响应。

对于路基不均匀沉降对上部结构和列车运行的影响,大多以理论研究为主。邹春华等^[3]采用余弦函数表示路基不均匀沉降,基于连续弹性支承梁理论,得到了有砟轨道轨面沉降分布计算公式。吴仲伦^[4]在研究路基冻胀引起的轨面不平顺时,基于有限元模型建立了具有一定初始隆起形状的路基,进而获得了轨道结构和钢轨对应的几何不平顺。Paixao 等^[5]基于有限元模型,较为系统地研究了路基不均匀沉降波长和幅值对轮轨动力响应的影响,并基于安全性和舒适性要求提出了相应的控制指标。针对整体刚度更好的板式无砟轨道,陈仁朋等^[6]研究了路基中长波不平顺下轨道板的受力,并基于抗弯疲劳强度允许值,提出了路基不均匀沉降的控制准则。由于路基沉降主要来自地基下沉,罗强等^[7]研究了地基差异沉降模式、路堤高度等因素对路基面不均匀变形的影响,并建立了两者的映射关系。陈兆玮等^[8-9]对不同类型板式无砟轨道系统的钢轨变形和桥墩沉降映射关系进行了理论推导,并获得了钢轨的变形区域与幅值。蒋丽忠等^[10]建立了数值解析模型和有限元模型,研究了不均匀沉降发生在不同路桥位置处的钢轨变形形态与映射关系。何春燕等^[11]进一步研究了路桥过渡段不均匀沉降与钢轨变形的映射关系,并应用于

列车的动力学分析。肖威^[12]、裴国史^[13]等分别针对高速铁路和有轨电车线路建立了板式无砟轨道数值模型,分析了轨面变形、轨道结构应力与路基不均匀沉降波长和幅值的相关规律。徐庆元等^[14]综合考虑了轨道不平顺、路基不均匀沉降、温度梯度和列车荷载的影响,基于混凝土底座疲劳破坏限值,提出高速铁路 CRTS I 型板式无砟轨道的不均匀沉降限值为 7 mm/20 m,但未研究其他沉降波长的影响。张克平等^[15]建立了考虑轨道自重荷载的车辆-轨道动力学模型,分析了行车速度、路基不均匀沉降波长和幅值对车辆动力学性能的影响。

综上所述,当路基发生不均匀沉降后,轨道结构力学响应不仅受列车动载的影响,也与其自重荷载作用密切相关。而且,不同路基支撑条件下的轨道结构抗弯刚度也在很大程度上决定了变形和应力的传递。实际上,轨面的形态映射和力学响应是轨道结构参数与路基不均匀沉降型式共同作用的结果,Auersch^[16]基于 Winkler 地基上的单层弹性支承梁模型,指出轨道存在一个与轨道抗弯刚度有关的截止波数,决定了轨面的映射特征。现有研究大多集中在路基不均匀沉降对轨道结构应力状态的定性讨论,未能建立路基不均匀沉降与轨面变形和轨道结构受力状态的定量关系。本文通过建立高速铁路 CRTSII 型板式无砟轨道-路基三维有限元模型,研究了典型路基不均匀沉降组合下的轨面映射特征,提出了考虑不均匀沉降波长的混凝土底座柔度,建立了基于柔度表征的轨面-路基几何形态映射、附加应力以及路基接触应力的相关关系,以定量评估非均匀支撑板式无砟轨道静力响应,提出敏感的不均匀沉降型式,并讨论了改变混凝土底座模量和厚度对提高轨面几何平顺性的效果。

1 数值模型

1.1 板式无砟轨道三维有限元模型

根据中国高速铁路广泛使用的 CRTSII 型板式无砟轨道,建立了三维有限元模型如图 1 所示。其

中,模型总长 60 m;钢轨采用 UIC60 型,以连续的欧拉梁单元模拟;轨道板 2.6 m(宽)×0.2 m(厚),CA 砂浆层(CAM)2.6 m(宽)×0.05 m(厚),混凝土底座 3.25 m(宽)×0.3 m(厚),基层表层 0.4 m 厚,采用六面体实体单元模拟.钢轨采用 WJ-7 型扣件系统固定到轨道板上,以刚度为 28.5 kN/mm 的垂直弹簧单元模拟.考虑到不均匀沉降的存在,当垂直接触压力降为零时,路基、混凝土底座、CAM 层和轨道板之间的界面允许分离.法向采用硬接触,切向接触由库仑摩擦模型模拟,接触面在开始相对滑动之前可承受临界切应力.模型底部为固定边界,四周采用对称约束并允许产生竖向位移 U_2 .数值模拟的计算参数根据浙江大学物理模型试验取值^[7],见表 1.

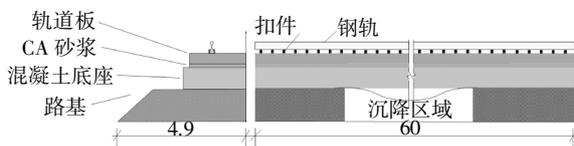


图1 CRTSII 板式无砟轨道断面图(单位:m)

Fig.1 Section of the CRTSII ballastless track (unit:m)

表1 数值模拟计算参数

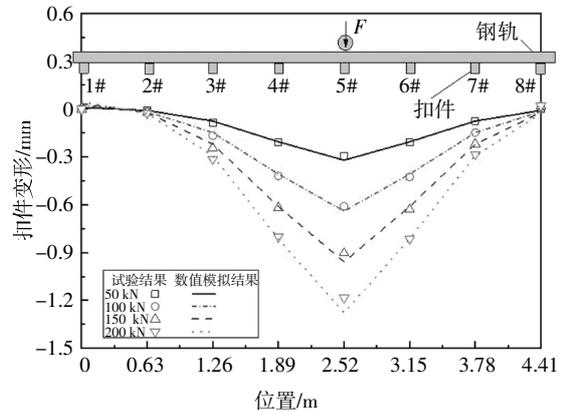
Tab.1 Calculation parameters of the numerical simulation

部件	密度/(g·cm ⁻³)	弹性模量/MPa	泊松比
钢轨	7.83	210 000	0.300
轨道板	2.70	35 000	0.167
CA 砂浆层	1.80	315	0.300
混凝土底座	2.70	24 000	0.167
路基	2.30	486	0.250

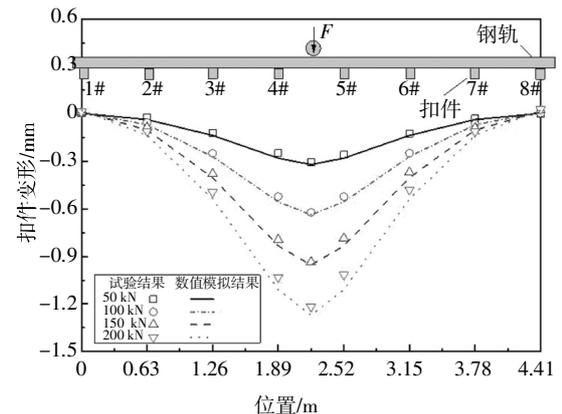
1.2 数值模型可靠性验证

浙江大学建立了全比尺的板式无砟轨道物理模型试验装置,并开展了列车轮轴作用下的扣件荷载分担比试验^[18-19].作动器通过分配梁将荷载传递至两侧钢轨上,例如当分配梁分别置于 5# 扣件和 4# 与 5# 扣件之间时(见图 2),模拟了列车轮轴分别移动至扣件上方和相邻两个扣件之间.作动器分级施加荷载 50~200 kN,增量为 50 kN.千分表固定在轨道板表面,以记录各级荷载下扣件系统的压缩变形,通过扣件刚度可换算得到分担到的荷载值.图 2 给出了各个扣件在分级荷载下的实测变形.当轴向荷载直接施加在扣件上方时,约 5 对扣件分配轴载.轴向荷载从 50 kN 增加到 200 kN 时,扣件的最大变形从 0.3 mm 增加到 1.2 mm.当轴载作用在两个相邻扣件

之间时,大约 6 对扣件分配轴载,钢轨最大变形量也从 0.3 mm 增加到 1.2 mm.数值模拟结果如图 2 中实线所示,在两个不同的位置施加轴载时,均与物理模型试验结果吻合较好.因此,后文将采用该三维有限元模型进一步研究路基不均匀沉降作用下板式无砟轨道结构的形态映射和附加应力特征.



(a) 载荷位于 5# 扣件正上方



(b) 载荷位于 4# 和 5# 扣件之间

图2 扣件变形的试验和数值模拟结果

Fig.2 Comparisons of fastener deformation between experimental and numerical results

1.3 不均匀沉降模型

有限元模型中,路基不均匀沉降的波长和幅值特征采用余弦函数表示,见式(1).

$$s(x) = \frac{A_0}{2} \left(1 - \cos \left(\frac{2\pi(x - x_0)}{L_0} \right) \right) \quad (1)$$

式中: $s(x)$ 是路基沉降; A_0 和 L_0 分别是沉降幅值和波长; x_0 是路基沉降发生的初始位置.数值模拟中选取不均匀沉降的波长为 5~40 m,间隔 5 m;沉降幅值为 5~40 mm,间隔 5 mm,共计 64 种组合.在对路基施加不均匀沉降之前,首先对模型进行地应力平衡,使其初始变形为零.随后,路基顶部节点向下移动以生成不均匀沉降边界,如图 1 所示.

2 轨道结构几何映射特征

图3给出了路基不均匀沉降15 mm(波幅)/10 m(波长)时轨道各层结构的变形.在自重荷载作用下,轨道结构同样产生波长为10 m的不均匀下沉,表明路基的沉降波长将完全映射至轨道.但是,从沉降幅值来看,轨道结构由于自身刚度较大,并未跟随路基一并下沉,而且钢轨与各层轨道结构的变形协调一致.例如当路基不均匀沉降幅值为15 mm时,轨道结构的沉降幅值仅为5.63 mm,此时轨道结构与路基产生脱离,将会导致轨道结构内应力增加,而且降水容易汇集此处,加剧路基和混凝土结构的水损害.另外,轨道结构较高的刚度导致在沉降区域的两侧出现了0.35 mm的上拱,这也将加剧列车的轮轨相互作用.

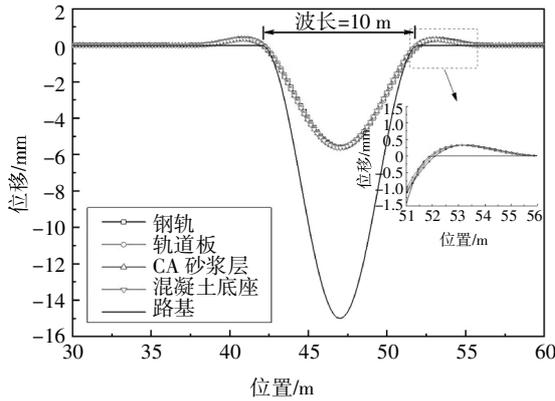


图3 15 mm/10 m 沉降下轨道结构的位移
Fig.3 Displacement of track structure under uneven settlement of 15 mm/10 m

由于路基不均匀沉降的波长特征完全映射至钢轨表面,现仅给出64种路基不均匀沉降组合下钢轨的位移幅值,如图4所示,可分为3个典型的波长范围.当沉降波长小于10 m时,沉降幅值对轨道结构的位移映射几乎没有影响.换言之,尽管在轨道表面测得的沉降相对较小,但并不表示路基沉降也很小.该阶段的轨道脱空若能及时发现并得到注浆修复,并不会影响轨道结构的几何形态.当沉降波长发展至超过20 m时,路基沉降量无论多大,轨道结构的位移与路基沉降一致,轨道结构与路基始终保持接触,此时恢复轨道的几何形态将非常困难.当沉降波长为16 m且沉降波幅小于15 mm时,轨道结构随着路基一同沉降,之后随着沉降幅值的增加,轨道结构与路基发生脱离,其位移幅值要低于真实的路基沉

降幅值.

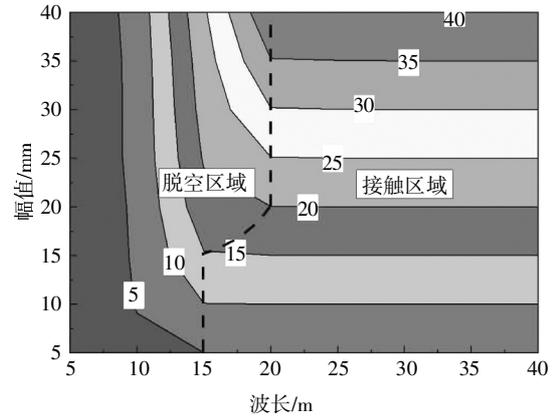


图4 路基不均匀沉降下的钢轨位移幅值
Fig.4 Displacement amplitude of rail under uneven subgrade settlement

一旦路基发生不均匀沉降且混凝土底座与路基之间产生脱空后,脱空区将丧失支撑作用.从图3看,整个轨道结构作为一个整体同步产生弯曲,跨距近似等于沉降波长,则板中心最大变形可表示为:

$$\Delta_{max} = \alpha \frac{qL_0^4}{D_c} \tag{2}$$

$$D_c = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)} \tag{3}$$

式中: q 为施加在板表面的均布荷载; L_0 是跨距,即沉降波长; D_c 是板的截面弯曲刚度; α 是系数; E 和 h 分别是弹性模量和板厚度; μ 是泊松比.对于同样的不均匀沉降跨距,轨道各层结构的变形主要由其弯曲刚度决定,根据表1可得到钢轨、轨道板、CA砂浆层和混凝土底座的弯曲刚度分别为: $6.42 \times 10^6 \text{ N}\cdot\text{m}$ 、 $2.40 \times 10^7 \text{ N}\cdot\text{m}$ 、 $7.99 \times 10^2 \text{ N}\cdot\text{m}$ 和 $5.55 \times 10^7 \text{ N}\cdot\text{m}$.可见,混凝土底座的弯曲刚度最大,相应的变形量最小.由于路基不均匀沉降首先映射至混凝土底座,混凝土底座的变形将决定整个轨道结构其他部分的几何形态.这也与上文描述一致,即轨道各层结构的位移保持一致.因此,可根据式(2)(3)计算得到混凝土底座变形量,即为轨道结构的整体位移量.对于给定自重荷载下的轨道结构,变形量 Δ_{max} 由 L_0^4 和 D_c 决定.将混凝土底座的柔度 δ 定义为:

$$\delta = \frac{q_0 L_0^4}{D_c} \tag{4}$$

其中, $q_0 = 1 \text{ kPa}$,沉降波长越长,相应的柔度和变形量将越大.图5给出了混凝土底座不同厚度和模量变化下柔度与不均匀沉降波长的关系,混凝土底座厚度和模量分别取值20~40 cm和24~35 GPa.其中,现行高速铁路设计规范建议采用的混凝土底座厚度

和模量为 40 cm 和 24 GPa。结果表明, 混凝土底座柔度随波长呈指数式增长。当波长小于 15 m 时, 柔度几乎不受沉降波长甚至是厚度和模量的影响; 当波长超过 20 m 时, 柔度快速增长, 并处于较高水平; 波长 15~20 m 是柔度变化的过渡区。柔度随沉降波长的发展规律与图 4 中的轨道位移映射规律一致, 这也证实了轨道结构和路基之间的映射特性主要由混凝土底座柔度决定。若能控制路基不均匀沉降波长不超过 15 m, 将很大程度上降低混凝土底座柔度和轨面变形。

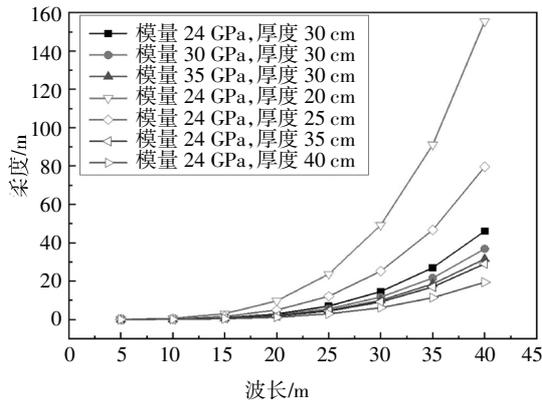


图 5 混凝土底座柔度与沉降波长的关系
Fig.5 Relationship between flexibility of concrete base and settlement wavelength

图 6 给出了不同沉降组合下的无量纲映射关系, 其中纵坐标为轨道位移映射比, 定义为轨道位移幅值 S_t 与路基沉降幅值 A_0 的比值, $S_t/A_0=1.0$ 表示路基沉降完全映射至轨道表面; $S_t/A_0<1.0$ 表示轨道结构与路基出现脱空。横坐标是沉降幅值 A_0 与柔度 δ 的比值, 综合考虑沉降幅值、波长和轨道参数的影响, 可以发现, 轨道位移映射比与归一化的沉降幅值 A_0/δ 具有很好的相关关系, 可通过分段函数表示:

$$\frac{S_t}{A_0} = \begin{cases} 1.0, & \frac{A_0}{\delta} \leq 0.015 \\ 0.075 \times \left(\frac{A_0}{\delta}\right)^{-0.659}, & \frac{A_0}{\delta} > 0.015 \end{cases} \quad (5)$$

从图 6 可发现, 存在临界值 $A_0/\delta = 0.015$, 用来判断轨道结构是否与路基分离。对于 $A_0/\delta \leq 0.015$ 的情况, 位移映射比始终为 1.0, 对应于沉降波长大于 20 m 或是波长为 15 m 且幅值小于 15 mm 的情况, 此时路基的沉降完全映射到轨道结构, 在轨道表面测得的沉降量即为路基的沉降。当归一化沉降幅度 $A_0/\delta > 0.015$ 时, 对应沉降波长小于 15 m, 此时的柔度很小, 如图 5 所示, 位移映射比随着归一化沉降幅

度的增加而迅速减小。对于沉降波长为 15 m、10 m 和 5 m 的情况, 随着沉降幅值从 5 mm 增加到 40 mm, 轨道位移映射比分别为 1.0~0.61、0.52~0.17 和 0.09~0.02, 这意味着此时从轨道检测获得的沉降将低于实际路基沉降量, 在波长小于 10 m 时尤其明显。

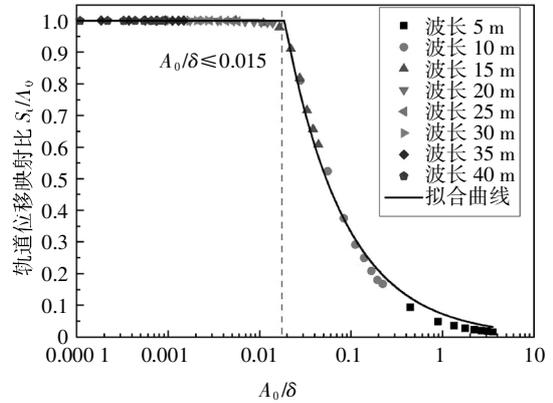


图 6 无量纲位移映射特征
Fig.6 Dimensionless mapping features of displacement

3 附加应力

运营初期的高速铁路路基不均匀沉降量较小, 在列车行驶的间隔期, 轨道结构和路基仅承受其自重荷载, 轨道结构几乎不存在附加的纵向应力(温度应力除外)。一旦路基产生不均匀沉降, 随着轨道变形量的增加, 相应的附加应力也逐步增大, 尤其是轨道结构和路基脱空后。以 15 mm(波幅)/10 m(波长)为例, 路基不均匀沉降引起的轨道板和混凝土底座纵向附加应力、路基接触应力分布如图 7 所示。可见, 轨道板和混凝土底座的底面和顶面均存在较大的拉应力区域, 其中, 板底的最大拉应力出现在不均匀沉降的中心区域, 而板顶的最大拉应力出现在不均匀沉降引起的拱起区域。因此, 在轨道结构强度设计时, 轨道板和混凝土底座表面的抗弯拉能力同样值得重视。另外, 路基不均匀沉降发生后, 脱空区域的接触应力降为零, 由于接触面积的减小, 沉降区域的边缘将产生应力集中, 例如沉降发生前路基表面的初始静应力为 0.014 MPa, 沉降发生后增大至 0.5 MPa, 这将加速路基土体的性能弱化。

不同沉降幅值和波长组合下的混凝土底座纵向应力如图 8 所示。当不均匀沉降波长低于 15 m 时, 混凝土底座的纵向拉应力随着波长的增加而增大。其中, 沉降波长为 5~10 m 时, 混凝土底座的纵向拉应力基本不随沉降幅值的增加而增大, 分别为 0.9 MPa 和 3.1 MPa; 沉降波长为 15 m 时, 混凝土底座的

纵向拉应力随沉降幅值的增加由 1.6 MPa 逐渐增大至 6.0 MPa;当沉降波长为 20~40 m 时,混凝土底座的纵向拉应力同样随沉降幅值的增加而线性增大,随波长的增大而逐渐减小,最大值由 6.9 MPa(波长 20 m)减小至 1.8 MPa(波长 40 m).若以 C40 混凝土弯拉强度设计值 5.5 MPa 为控制标准,在天窗期间仅考虑轨道结构自重作用下,不均匀沉降幅值和在对应的波长下应不超过 27.5 mm(波长 15 m)和 31.5 mm(波长 20 m).

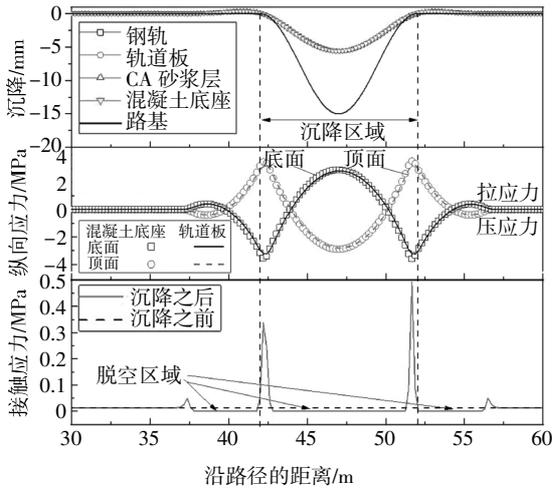


图 7 15 mm/10 m 的路基不均匀沉降下附加应力

Fig.7 Additional stress under uneven settlement of 15 mm/10 m

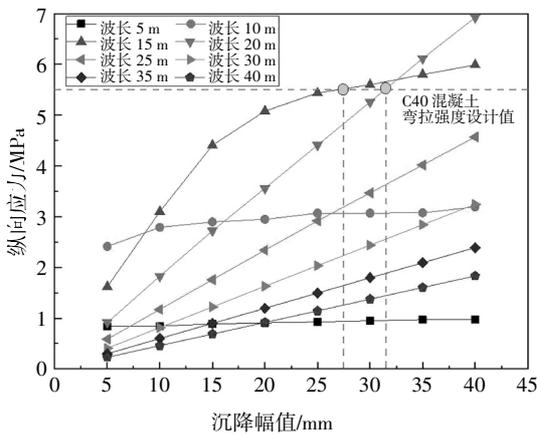


图 8 不均匀沉降下的混凝土底座纵向应力

Fig.8 Longitudinal stress of concrete base under uneven settlement

图 9 给出了混凝土纵向应力与归一化沉降幅值 A_0/δ 的相关关系,其中纵坐标是纵向应力 σ_{wc} 与沉降波长 L_0 的比值.对于波长大于 15 m 的情况,混凝土底座与路基保持良好接触,纵向应力 σ_{wc} 近似表示为:

$$\frac{\sigma_{wc}}{L_0} = 0.4 \times \left(1 - e^{-\frac{90A_0}{\delta}} \right), L_0 \geq 15 \text{ m} \quad (6)$$

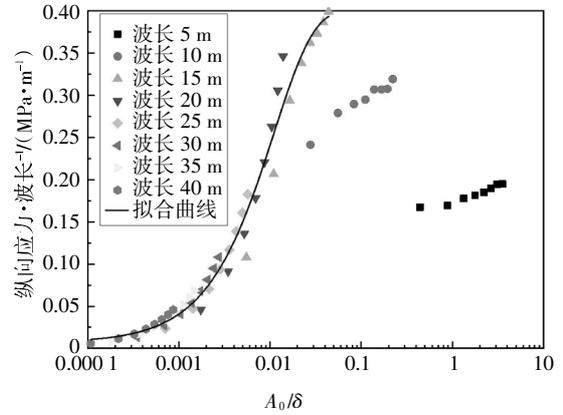


图 9 纵向应力与归一化沉降幅值 A_0/δ 的关系

Fig.9 Relationship between longitudinal stress and normalized settlement amplitude A_0/δ

实际上,若考虑列车荷载的疲劳效应,不均匀沉降控制标准将更为严苛.根据混凝土疲劳强度史密斯设计理论,混凝土疲劳强度不仅取决于循环中的最大应力,而且取决于最小应力,如图 10(a)所示.其中 β_{BZ} 为混凝土的弯曲抗拉强度,对于 C40 混凝土底座, $\beta_{BZ} = 5.5 \text{ MPa}$; σ_{wc} 为最小拉应力值,即自重荷载作用下的附加应力; n 为列车荷载循环次数,对于板式无砟轨道,一般考虑 200 万次荷载循环,即 $n=2 \times 10^6$; σ_Q 为疲劳强度允许值,即列车荷载引起的混凝土底座拉应力 σ_D 应低于 σ_Q .混凝土的弯曲疲劳强度允许值 σ_Q 与附加应力 σ_{wc} 关系为:

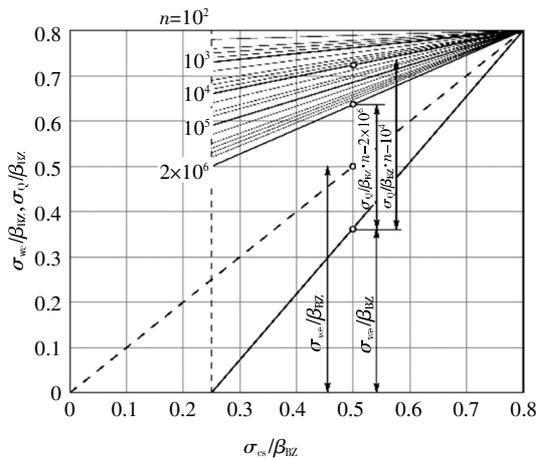
$$\sigma_D \leq \sigma_Q = \frac{\beta_{BZ}}{11} \times \left(4 - \frac{5\sigma_{wc}}{\beta_{BZ}} \right) \quad (7)$$

混凝土底座疲劳强度允许值与不均匀沉降幅值和波长的关系如图 10(b)所示.可见,随着混凝土底座附加应力的增加,疲劳强度允许值逐渐减小.其中,当不均匀沉降波长为 15 m 和 20 m、相应的沉降幅值分别超过 15 mm 和 20 mm 时,由不均匀沉降导致的混凝土底座附加应力已达到弯曲疲劳强度允许值 σ_Q .对于其他沉降工况,需要进一步结合列车动荷载导致的混凝土拉应力,以判断混凝土底座的疲劳开裂情况.

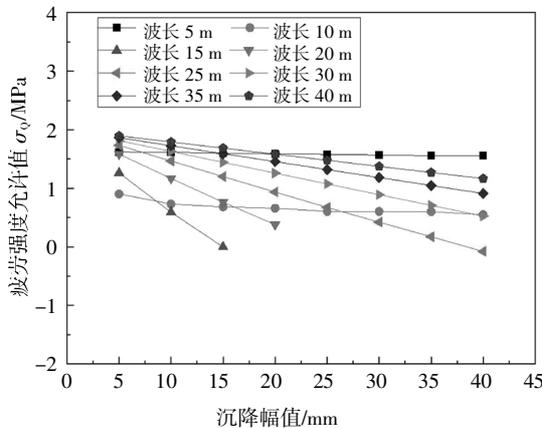
不同沉降组合下的路基表面接触应力峰值如图 11 所示.波长为 5 m 和 10 m 时,接触应力稳定在 0.25 MPa 和 0.53 MPa.而波长为 15 m 时,接触应力在沉降幅值较小时处于低应力水平,此时并未发生

脱空;而后随着沉降幅值快速增加至 0.65 MPa,超过了路基允许压应力 0.15 MPa 的参考值^[12].当沉降波长达到 20 m 及以上时,路基接触应力快速减小,处于较低的应力水平.可见,路基接触应力的不利波长范围为 10~15 m,且随沉降范围和幅值的增加而增大,主要集中在脱空情况下发生.列车荷载作用下,路基通常先产生波长和幅值较小的局部沉降,此时将导致接触应力重分布,使得沉降区域边缘的应力水平增加,导致土体逐渐进入屈服阶段,进而产生更大的沉降变形和更广的沉降区域.应该注意的是,在沉降波长处于 10~15 m 范围内,沉降幅值和沉降范围的增长存在着恶性循环关系.因此,应及时对波长小于 10 m 的局部沉降进行修复,以避免沉降区域的进一步发展和对轨道结构的潜在威胁.图 12 进一步给出了路基接触应力 σ_{cs} 与归一化沉降幅值 A_0/δ 相关关系,并近似表示为:

$$\frac{\sigma_{cs}}{L_0} = 0.05 \times \left(1 - e^{-\frac{37.5A_0}{\delta}} \right) \quad (8)$$



(a)混凝土疲劳强度史密斯设计图



(b)混凝土底座弯曲疲劳强度允许值

图 10 混凝土底座疲劳强度

Fig.10 Fatigue strength of concrete base

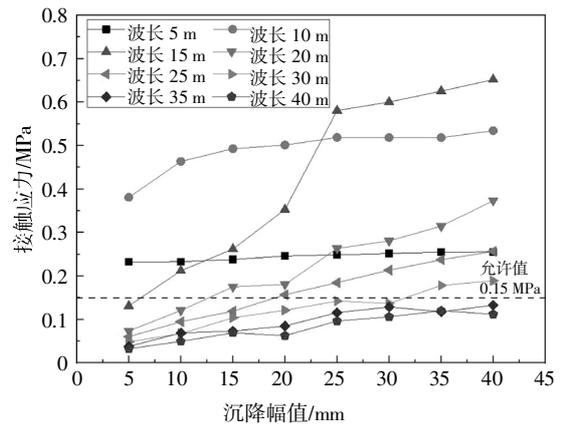


图 11 不同沉降下的路基接触应力峰值

Fig.11 Peak values of subgrade contact stress under different settlements

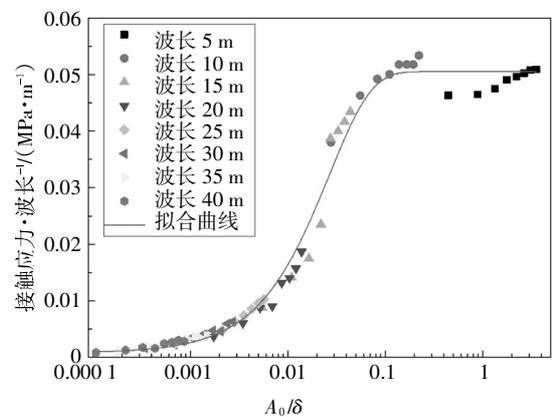


图 12 接触应力与归一化沉降幅值 A_0/δ 的关系

Fig.12 Relationship between contact stress and normalized settlement amplitude A_0/δ

4 轨道结构模量与厚度的影响分析

轨道结构几何形态映射和附加应力主要与混凝土底座的柔度有关,依次选取混凝土底座模量 24 GPa、30 GPa 和 35 GPa,厚度 20 cm、25 cm、30 cm、35 cm 和 40 cm,分析其对板式无砟轨道静力学性能的影响.计算时选取路基不均匀沉降波长为 20 m、幅值为 15 mm.

图 13 给出了混凝土底座模量对各结构层变形和受力特性的影响.轨道结构最大变形和附加应力最大值所对应的位置均处于最大沉降处上方.从图中可以看出,当模量从 24 GPa 增加到 35 GPa 时,路基不均匀沉降导致的轨道结构各层最大变形和混凝土底座拉应变略微减小,分别降低了约 0.2% 和 1.9%;轨道板、CA 砂浆与混凝土底座的层间接触应力分别降低了 5.3%、4.8%,而路基表面的接触应力

发生了较为明显的增长,由 0.17 MPa 增加至 0.22 MPa,增幅 24.1%,表明路基接触应力对轨道刚度的变化更为敏感.增大混凝土模量对于提高轨道结构抵抗变形能力的作用并不显著,反而增加了路基接触应力.

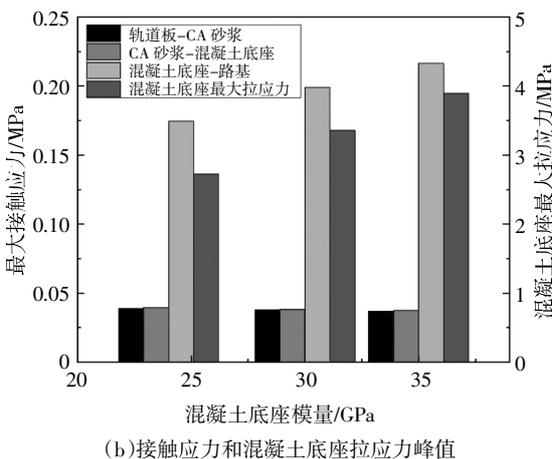
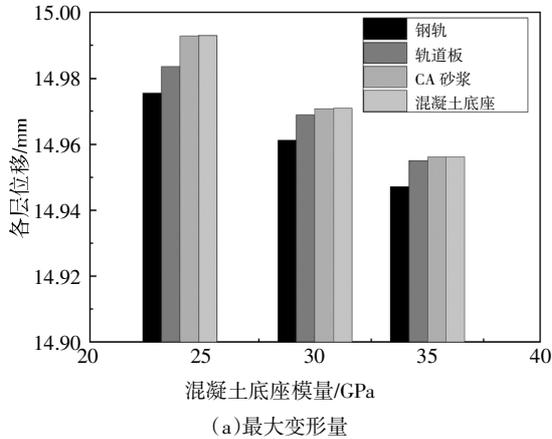
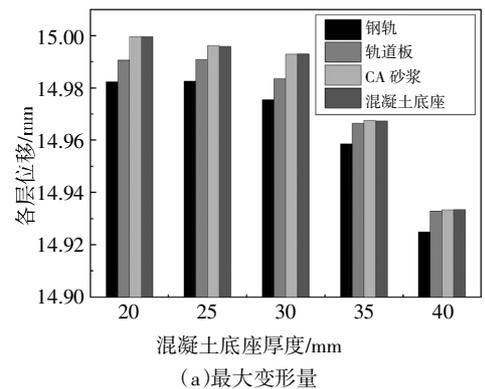


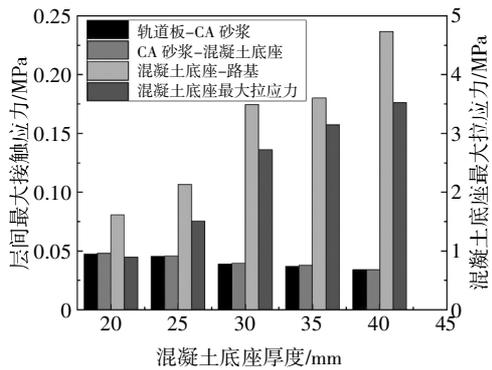
图 13 混凝土底座模量对轨道变形和受力的影响

Fig.13 Influences of concrete base modulus on track deformation and additional stress

图 14 进一步给出了路基不均匀沉降作用下混凝土底座厚度变化对各结构层变形和应力的影响.从图 14 可看出,当混凝土底座厚度从 20 cm 增加到 40 cm 时,路基不均匀沉降导致的轨道结构各层最大变形略微减小,轨道板与 CA 砂浆、CA 砂浆与混凝土底座的接触应力分别降低了 27.9%、29.0%;而混凝土底座拉应变和路基表面的接触应力发生了较为明显的增长,分别提高了 2.9 倍和 1.9 倍.可见,增大混凝土底座的厚度虽然提高了轨道的抗变形能力,但由于其自重的增加,反而导致混凝土底座拉应变和路基接触应力增幅显著.因此,在通过增大轨道结构抗弯刚度提高轨面几何平顺性时,也要考虑到其对结构自身拉应变和路基接触应力的不利影响.



(a)最大变形量



(b)接触应力和混凝土底座拉应力峰值

图 14 混凝土底座厚度对轨道变形和受力的影响

Fig.14 Influences of concrete base thickness on track deformation and additional stress

5 结论

1)轨道各层结构始终保持接触,其变形波长特征与路基不均匀沉降几乎一致,但在沉降区域的两侧出现略微的拱起;轨道结构与路基的接触状态受不均匀沉降波长和幅值的共同影响,在沉降波长小于 15 m,或者波长在 15~20 m 之间且沉降幅值大于 15 mm 时,轨道结构与路基出现脱空,此时通过轨道结构测试得到的沉降会低估路基的实际沉降量.

2)轨道结构变形量的增加会导致混凝土结构附加拉应力和路基接触应力的增大,尤其是轨道结构和路基脱空后,附加应力也会随着沉降范围的扩大而增大.其中,混凝土底座的附加应力最接近于其疲劳强度,易发生开裂破坏;路基接触应力过大也容易导致土体产生塑性屈服,扩大不均匀沉降的幅值和范围.

3)轨道结构的映射特性主要由混凝土底座柔度决定.波长小于 15 m 时,柔度很小,几乎不受沉降波长甚至是厚度和模量的影响,此时的轨道几何形态映射量很小但附加应力较高;当波长超过 20 m 时,柔度快速发展,轨道变形量较大但附加应力较低;同时,轨道结构形态特征和附加应力与沉降幅值和柔

度的比值 A_0/δ 有很好的相关关系,并分别建立了轨道结构变形量、混凝土结构附加应力以及路基接触应力与 A_0/δ 的经验计算公式。

4)在现有的设计参数范围内,增加混凝土底座的模量和厚度对提高轨面几何平顺性并不显著,反而会增大结构自身的拉应力和路基接触应力。

下一步将考虑引入车辆荷载,研究轨道几何形态映射对列车高速运行的影响。

参考文献

- [1] 蒋正舜, 苟志龙. 内马铁路陡坡路基不均匀沉降及影响因素分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2018, 45(S1): 25—29.
JIANG Z S, GOU Z L. Analysis of uneven settlement and influencing factors of steep slope at Nairobi—Malabar railway [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2018, 45(S1): 25—29. (In Chinese)
- [2] 陈仁朋, 朱建宇, 姜正晖, 等. 基于舒适性的软土地区公路行驶质量评价方法[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2020, 47(7): 120—127.
CHEN R P, ZHU J Y, JIANG Z H, *et al.* Evaluation method of driving quality of roads constructed in soft soil area based on driving comfort [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2020, 47(7): 120—127. (In Chinese)
- [3] 邹春华, 周顺华, 王炳龙. 有砟轨道路基不均匀沉降引起轨枕空吊的计算方法[J]. 铁道学报, 2013, 35(1): 87—92.
ZOU C H, ZHOU S H, WANG B L. Calculation method of unsupported sleepers caused by differential subgrade settlement of ballasted track [J]. Journal of the China Railway Society, 2013, 35(1): 87—92. (In Chinese)
- [4] 吴仲伦. 高速铁路路基冻胀对轨道不平顺的影响分析及动力响应[D]. 北京: 北京交通大学, 2015: 16—20.
WU Z L. Analysis of track irregularity and dynamic response for the influence of high speed railway subgrade frost heaving[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015: 16—20. (In Chinese)
- [5] PAIXAO A, FORTUNATO E, CALCADA R. The effect of differential settlements on the dynamic response of the train—track system: a numerical study[J]. Engineering Structures, 2015, 88: 216—224.
- [6] 陈仁朋, 王作洲, 蒋红光, 等. 基于轨道板抗弯疲劳强度的不均匀沉降控制[J]. 浙江大学学报(工学版), 2013, 47(5): 796—802.
CHEN R P, WANG Z Z, JIANG H G, *et al.* Control standard of differential settlement in high-speed railway slab based on bending fatigue strength [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2013, 47(5): 796—802. (In Chinese)
- [7] 罗强, 李铁, 王佳敏, 等. 高速铁路路堤传递地基差异沉降特性及控制限值研究[J]. 中国科学(技术科学), 2014, 44(7): 736—743.
LUO Q, LI T, WANG J M, *et al.* Analysis on conduction characteristics from embankment and control limits of foundation differential settlement for high speed railway [J]. Scientia Sinica (Technologica), 2014, 44(7): 736—743. (In Chinese)
- [8] 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): 单元板式无砟轨道系统[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—part(I): The unit slab track system [J]. Scientia Sinica (Technologica), 2014, 44(7): 770—777. (In Chinese)
- [9] 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): 纵连板式无砟轨道系统[J]. 中国科学(技术科学), 2014, 44(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): The longitudinal connected ballastless track system [J]. Scientia Sinica (Technologica), 2014, 44(7): 778—785. (In Chinese)
- [10] ZHOU W B, NIE L X, JIANG L Z. Mapping relation between pier settlement and rail deformation of unit slab track system [J]. Structures, 2020, 27: 1066—1074.
- [11] 何春燕, 陈兆玮, 翟婉明. 高速铁路路桥过渡段不均匀沉降与钢轨变形的映射关系及动力学应用[J]. 中国科学(技术科学), 2018, 48(8): 881—890.
HE C Y, CHEN Z W, ZHAI W M. Mapping relationship between uneven settlement of subgrade and rail deformation in subgrade—bridge transition section and its dynamic application [J]. Scientia Sinica (Technologica), 2018, 48(8): 881—890. (In Chinese)
- [12] 肖威, 郭宇, 高建敏, 等. 高速铁路路基不均匀沉降对CRTSⅢ板式轨道受力变形的影响[J]. 铁道科学与工程学报, 2015, 12(4): 724—730.
XIAO W, GUO Y, GAO J M, *et al.* Effect of uneven subgrade settlement on the CRTS III slab track stress and deformation of high-speed railway [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2015, 12(4): 724—730. (In Chinese)
- [13] 裴国史, 高建敏, 郭宇. 路基不均匀沉降对共享路权有轨电车轨道结构受力的影响[J]. 铁道科学与工程学报, 2018, 15(11): 2772—2779.
PEI G S, GAO J M, GUO Y. Influence of uneven subgrade settlement on track structure stress of tramcar on sharing road right [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2018, 15(11): 2772—2779. (In Chinese)
- [14] 徐庆元, 李斌, 周智辉. CRTS—I型板式无砟轨道线路路基不均匀沉降限值研究[J]. 中国铁道科学, 2012, 33(2): 1—6.
XU Q Y, LI B, ZHOU Z H. Study on the limited value for the uneven settlement of subgrade under CRTS— I type slab track [J]. China Railway Science, 2012, 33(2): 1—6. (In Chinese)
- [15] 张克平, 石广田, 和振兴. 路基不均匀沉降对地铁A型车辆动力学特性影响研究[J]. 振动与冲击, 2020, 39(17): 165—170.
ZHANG K P, SHI G T, HE Z X. Effects of subgrade uneven settlement on dynamic characteristics of metro type A vehicles [J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(17): 165—170. (In Chinese)
- [16] AUERSCH L. Excitation of ground vibration due to the passage of trains over a track with trackbed irregularities and a varying support stiffness[J]. Vehicle System Dynamics, 2015, 53(1): 1—29.
- [17] BIAN X C, JIANG H G, CHEN Y M, *et al.* A full-scale physical model test apparatus for investigating the dynamic performance of the slab track system of a high-speed railway[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2016, 230(2): 554—571.
- [18] JIANG H G, BIAN X C, CHENG C, *et al.* Simulating train moving loads in physical model testing of railway infrastructure and its numerical calibration[J]. Acta Geotechnica, 2016, 11(2): 231—242.
- [19] JIANG H G, BIAN X C, JIANG J Q, *et al.* Dynamic performance of high-speed railway formation with the rise of water table[J]. Engineering Geology, 2016, 206: 18—32.