DOI:10.11918/201910092

季冻区 CRTS I 型无砟轨道不平顺规律及受力特性

闫 斌[1,2], 谢浩然[1], 沈青川[1,2], 李 哲[1]

(1.中南大学 土木工程学院, 长沙 410075;2.高速铁路建造技术国家工程实验室, 长沙 410075)

摘 要: 为探讨路基冻胀变形对轨道不平顺及结构受力的影响规律,基于 ANSYS 有限单元分析方法,以哈大高速铁路冻胀区路基段为研究基础,建立了考虑限位凸台、凝胶树脂及层间粘结接触特征的 CRTS I 型板式无砟轨道-路基冻胀冻融耦合精细化有限元模型. 在此基础上,探讨局部冻胀区路基冻胀变形发生位置、不同冻胀波长及幅值对无砟轨道结构的影响,分析了短波冻胀下轨道不平顺、层间离缝特性与静力学性能. 结果表明:短波冻胀时无砟轨道结构不平顺范围、变形、离缝、受力等各项指标均随冻胀波长的减小、冻胀峰值的增加而增大;冻胀发生于底座板板中时对轨道结构受力影响最大,冻胀发生于底座板伸缩缝时对轨道结构变形离缝影响最大;相对于轨道板结构,底座板承受拉应力最大,冻胀发生于底座板板中时结构受力影响更大;在轨道结构抗拉强度方面,底座板为限制结构,建议冻胀检修限值的波长为 10 m、峰值为 5 mm.

关键词: 高速铁路;无砟轨道;路基冻胀;轨道不平顺;层间离缝;结构应力;有限元

中图分类号: U213.912 **文献标志码**: A **文章编号**: 0367-6234(2021)03-0110-08

Irregularity properties and stress characteristics of CRTS I ballastless track in seasonal frozen area

YAN Bin[1,2], XIE Haoran[1], SHEN Qingchuan[1,2], LI Zhe[1]

(1. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China;
2. National Engineering Laboratory for High Speed Railway Construction, Changsha 410075, China)

Abstract: To investigate the influence of subgrade frost heaving deformation on track irregularity and structural stress, based on the ANSYS finite element analysis method and the research on the subgrade section of the frost heaving zone of the Harbin-Dalian high-speed railway, the spatial refinement finite element model of CRTS I type ballastless track was established by considering the characteristics of limit boss, gel resin, and interlayer contact. On this basis, effects of the locations of frost heaving deformation and different frost heaving wavelengths and amplitudes on the ballastless track structure were discussed, and the track irregularity, interface crack characteristics, and static performance were analyzed. Results show that under short-wave frost heave, indicators of irregularity, deformation, interface crack, and stress of the ballastless track structure increased with the decrease of the frost heaving wavelength and the increase of the frost heaving amplitude. When the frost heave occurred in the center of the baseplate, the stress on the track structure was the most affected, and when the frost heave occurred in the baseplate expansion joint, it had the greatest effect on the deformation and interface crack of the structure. Compared with the track slab, the baseplate bore the largest tensile stress, and the structural stress was more affected when the frost heave occurred in the center of the baseplate. In terms of the tensile strength of the ballastless track, the baseplate was the limited structure, and the frost heaving limiting values ware recommended to be 10 m for wavelength and 5 mm for amplitude.

Keywords: high-speed railway; ballastless track; subgrade frost heaving; track irregularity; interface crack; stress of track structure; finite element

对于季节性冻土区域而言,冻胀和融沉是导致线路质量不良、影响高速铁路运行品质的关键因素[1-3]. 根据沈阳铁路局检测所提供的“第 6 期冻害监测工作日志”冻胀调研资料[4],哈大高速铁路路基 281 670 测点中,76%均存在冻胀现象,其中竖向变形为 5~10 mm 占 21.9%,竖向变形为 10~15 mm 的占 3.7%,0.49%测点冻胀竖向变形超过 15 mm. 在高速列车循环动载下,冻胀区路基高低不平顺快速传递至上层无砟轨道结构,导致轨道板与砂浆层、底座板与基床表层之间产生离缝,甚至粘结强度的完全丧失,直接影响轨道平顺性与受荷能力. 此外,高寒环境中,混凝土底座板和砂浆层在反复冻融循环作用下耐久性大大降低[5-7],材料性能折减导致轨

收稿日期: 2019-10-15
基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB1201204);国家自然科学基金(51608542);中南大学中央高校基本科研业务费专项资金(2019zzts629)
作者简介: 闫 斌(1984—),男,副教授,博士生导师
通信作者: 闫 斌,binyan@csu.edu.cn

道结构受力不均并产生裂纹与疲劳损伤. 研究冻胀冻融条件下轨道结构的变形与力学性能具有重要意义. 国内外学者针对严寒地区高速铁路无砟轨道路基冻胀作用规律已进行了广泛而深入的研究. 文献[8-9]通过研究路基冻胀变形下无砟轨道力学响应提出了合理的路基冻胀控制标准;文献[10]通过动态有限元分析论述了冻胀作用下轨道结构静动力学特性;文献[11-12]通过砂浆粘结试验进行了轨道结构层内聚力变化规律与变形特征分析;文献[13]通过施加外部行车激励分析了冻胀效应下轨道几何不平顺对结构动力响应特征;文献[14]通过混凝土力学性能试验提出了季冻地区路基填料改良与保温措施;文献[15]基于有限单元法,分析了Ⅰ型轨道板端部与砂浆层间的离缝工况对车辆-轨道系统力学性能的影响,对于底座板与基床表层离缝予以简化,弱化了整体离缝效应. 文献[16]基于 ANSYS+SIMPACK,建立了车辆-无砟轨道刚柔耦合动力学分析模型,分析了不同冻胀波长及幅值对车辆-轨道系统的轮轨动力响应. 鉴于 CRTS Ⅰ型板式无砟轨道的特殊结构与传荷性能,对路基冻胀下轨道结构变形规律与力学性能研究仍相对较少,层间离缝脱空机理仍不明确.

本文利用 ANSYS 有限元分析软件,以哈大线冻胀区路基段 CRTS Ⅰ型板式无砟轨道为研究对象,建立了考虑限位凸台、凝胶树脂及层间粘结接触特征的无砟轨道-路基空间耦合有限元模型,在此基础上,探讨局部冻胀区冻胀作用位置、冻胀峰值、冻胀波长对轨道结构的影响,分析了短波冻胀下轨道结构离缝变形不平顺规律与静力学特性.

1　CRTS Ⅰ型板式无砟轨道-路基计算模型

1.1　有限元模型

CRTS Ⅰ型板式无砟轨道主要由钢轨、WJ-7 无挡肩扣件系统、轨道板、砂浆垫层、凸型挡台、环形凝胶树脂以及底座板和基床构成[17],横断面详见图 1.

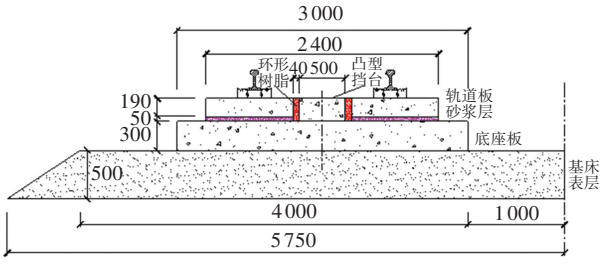


图 1　CRTS Ⅰ型板式无砟轨道横断面构造(mm)

Fig.1　Cross section of CRTS Ⅰ ballastless track (mm)

钢轨型号为 CHN60 轨,视为“Eular 梁”,采用 Beam188 梁单元模拟,扣件采用 Combin14 线性弹簧单元和 Combin39 非线性弹簧单元分别模拟横、垂向扣件刚度与纵向刚度. 轨道板、砂浆层、凸型挡台、环形树脂、底座板以及基床均采用具有大变形能力的 Solid45 实体单元模拟. 轨道模型基于 5 m×2.4 m×0.19 m 预制单元轨道板拼装组合,相邻单元板轨缝为 0.07 m,端部限位挡台采用半圆形规格. 工程实际中,高寒地区混凝土底座板每隔 3 块轨道板设置一条伸缩缝,伸缩缝宽度取 0.07 m. 考虑限位凸台、凝胶树脂及层间接触关系,建立的 CRTS Ⅰ型板式无砟轨道空间仿真模型如图 2 所示.

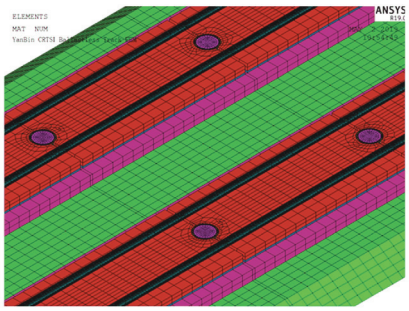


图 2　CRTS Ⅰ型板式无砟轨道-路基空间有限元模型

Fig.2　Finite element model of CRTS Ⅰ ballastless track

扣件系统采用 WJ-7B 型扣件,纵向刚度按照 18 750 N/0.625 m 设置,横向刚度为 3×10^7 N/m,垂向刚度为 5×10^7 N/m,不计阻尼[17],布置间距为 0.625 m. 相关参数设置见表 1.

表 1　轨道结构参数

Tab.1　Parameters of track structures

结构	泊松比	弹性模量/GPa	密度/(kg·m^{-3})	备注
钢轨	0.3	210.0	7 800	CHN60 轨
轨道板	0.2	36.0	2 500	C60 混凝土
凸型挡台	0.2	33.0	2 500	C40 混凝土
环形树脂	—	0.02	1 100	优异粘结性能
砂浆层	0.15	0.30	2 000	低温敏感
底座板	0.2	33.0	2 500	C40 混凝土
基床表层	—	0.12	2 000	面刚度为 76 MPa·m^{-1}

1.2　接触定义、边界条件与荷载约束

研究路基冻融冻胀对无砟轨道作用规律时,需要考虑轨道板与砂浆层、底座板与基床表层的相对位移,即离缝产生机理. 对轨道整体结构进行共节点耦合,轨道板与砂浆间、轨道板与端部挡台和树脂间以及底座板与基床表层间均采用 Target170 单元模拟 3D 刚性“目标”面,Contact174 单元模拟 3D 柔性“接触”面,通过设置可分离式“接触对”模拟实际面-面接触[18],所有接触面摩擦系数取为 0.5,即于接触面间传递法向力,通过产生相对滑移来模拟离缝的产生与发展.

冻胀结果可通过基床表层与底座板接触界面变形曲线来表征. 基于此,在计算中均以此界面作为

垂向边界条件,将冻胀波作为输入条件. 采用余弦波来模拟路基冻胀基本波形,如图 3 所示.

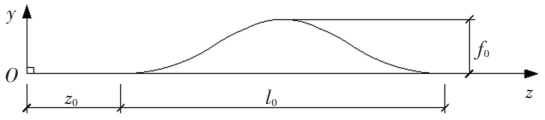


图 3 余弦型路基不均匀冻胀曲线

Fig.3 Cosine curve of uneven subgrade frost heaving

冻胀曲线描述函数为

$$y = \frac{f_0}{2}\left[1 - \cos\frac{2\pi(z - z_0)}{l_0}\right]. \quad (1)$$

式中:f_0 为冻胀幅值,z 为冻胀发生位置,z_0 为冻胀起始位置,l_0 为冻胀波长.

考虑重力作用下累计变形效应,在进行模态响应后,针对路基底部施加全约束并进行结构地应力预平衡,对钢轨两端进行全约束以模拟无缝线路,对基床、底座板端部进行约束,侧向释放自由度.

按照图 4 所示分别将基床表层局部冻胀变形加载于底座板板中(位置 a)、板缝(位置 b) 处.

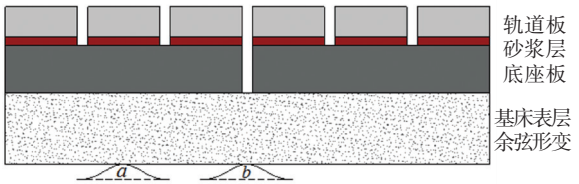


图 4 路基冻胀波作用位置

Fig.4 Subgrade frost heaving positions

2 路基冻胀基本规律及验证

基于 ANSYS 有限元模型,计算得到冻胀波长为 15 m、峰值为 15 mm 工况下无砟轨道结构变形示意图如图 5 所示,其中轨道板、底座板结构在与基床形变的互制作用下均发生上拱变形,中心处最大.

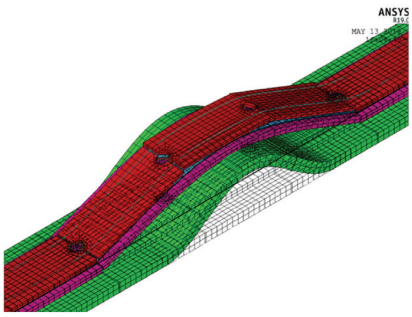
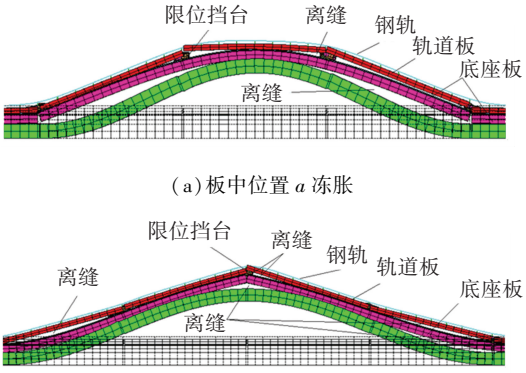


图 5 路基冻胀作用下无砟轨道结构变形示意图

Fig.5 Schematic diagram of deformation of ballastless track under subgrade frost heaving

结合图 4 加载方式,路基冻胀对轨道结构的垂向形变作用规律如图 6 所示. 当路基冻胀发生在位置 a 时,底座板结构会产生一定的跟随性变形,考虑到结构本身具有一定的抗弯刚度,在与基床表层的互制作用下,二者会在冻胀波波脚处产生离缝;在冻胀波峰正上方,轨道板结构与砂浆层、底座板发生明显的分离现象,轨道板端部离缝量达到最大,两侧轨道板与底座板接触状态则较为良好.



(a) 板中位置 a 冻胀

(b) 板缝位置 b 冻胀

图 6 路基冻胀作用对无砟轨道结构上拱变形影响示意图

Fig.6 Schematic diagram showing influence of subgrade frost heaving on arch deformation of ballastless track

对比位置 b 与位置 a 冻胀作用差异性,底座板在冻胀峰值(伸缩缝)处发生翘曲变形,在波脚处产生离缝变形,但作用范围小于作用于位置 a 时;值得注意的是,中心凸型挡台处,轨道板、底座板结构均发生一定的分离现象,产生微量离缝,限位传荷能力较差. 冻胀波峰两侧轨道板结构与砂浆层、底座板粘结良好,而在波脚处发生分离,离缝量较大. 图 7 为哈大线现场实测轨道板与砂浆层脱空离缝现象,结合图 6 及离缝产生机理,初步验证本模型具有一定可靠性.



(a) 板中冻胀 (b) 板缝冻胀

图 7 现场实测轨道板与砂浆层离缝

Fig.7 Interface crack between track slab and mortar layer

针对冻胀波长为 20 m、冻胀峰值为 20 mm 无砟轨道,本文通过仿真分析得到无砟轨道结构变形与静力学特性,并与文献[8-9,12]进行对比,结果见表 2. 其中,板中冻胀指冻胀发生在底座板中部,板缝冻胀指发生在底座板伸缩缝处. 表中 L_r 为钢轨位移、P_t 为轨道板拉应力、P_b 为底座板拉应力、D_{t-m} 为轨道板 - 砂浆层离缝、D_{b-s} 为底座板 - 基床离缝、L_f 为底座板离缝量最大值位置相对路基冻胀中心距离,"—" 表示数据缺失.

表 2　模型计算数据结果

Tab.2　Model verification and data comparison

工况	数据源	L_t/mm	P_t/MPa	P_b/MPa	D_{t-m}/mm	D_{b-s}/mm	L_f/m
板中冻胀	本文	19.94	1.76	2.95	0.72	2.23	8.1
	文献[8]	19.98	1.82	2.83	0.78	2.12	—
	文献[9]	19.96	1.94	3.05	—	2.27	8.4
	文献[12]	20.06	1.89	—	—	2.25	—
板缝冻胀	本文	20.63	0.68	3.65	0.52	0.92	—
	文献[8]	20.71	—	—	0.48	0.89	7.8
	文献[9]	20.98	0.69	3.39	—	0.98	7.3
	文献[12]	—	—	—	—	—	—

从表 2 可以看到，由于对比算例中部分参数难以获取，本文计算结果与文献有一定差异性，但基本规律较为吻合，可认为本文建立的三维实体有限元耦合冻胀模型可用.

3　路基冻胀对轨道不平顺的影响

根据沈阳铁路局冻胀监测结果，哈大高铁基床表层冻胀峰值见表 3[4].

表 3　哈大高速铁路路基变形量监测结果[4]

Tab.3　Monitoring data of subgrade deformation of Harbin-Dalian high-speed railway[4]

类型	测点总数	不同冻胀峰值的测点数			
		0~5 mm	5~10 mm	10~15 mm	≥15 mm
路堤	179 844	99 410	26 830	3 280	113
路堑	101 826	59 026	20 230	4 460	939

基于相同季冻区研究对象与相似工程条件、地质条件，结合 2011—2012 年度、2012—2013 年度哈大高速铁路路基冻胀静态检测数据[10]，在计算路基冻胀对 CRTS Ⅰ型板式无砟轨道的影响时，考虑短波冻胀较不利工况，路基冻胀波长及冻胀峰值的取值：冻胀波长取值分别为 5、10、15 m；冻胀峰值取值分别为 5、8、15 mm.

根据工程实际，路基冻胀峰值一般发生在底座板板中和底座板伸缩缝位置处. 因此，将路基冻胀峰值分别加载至底座板板中和底座板伸缩缝位置处. 考虑加载工况，在不影响分析精度的情况下，视加载工况分别建立 45.56、60.77 m 纵向长度 CRTS Ⅰ型板式无砟轨道-路基冻胀模型.

3.1　路基冻胀-轨道不平顺的传递规律

考虑路基冻胀峰值较不利工况，其在 5~10 mm 之间占比较大，此处设置冻胀波峰 8 mm，冻胀波长与轨道结构各层垂向位移关系如图 8 所示.

由图 8 可以看出：在路基冻胀变形下，轨道自上而下的不平顺传递特性与局部冻胀发生位置有关. 当冻胀发生于位置 a 时，轨道不平顺最大值与冻胀峰值较为接近，无畸形形变；当冻胀发生在位置 b 时，冻胀变形将会导致轨道不平顺在冻胀中心处的增大，增幅 11.3%.

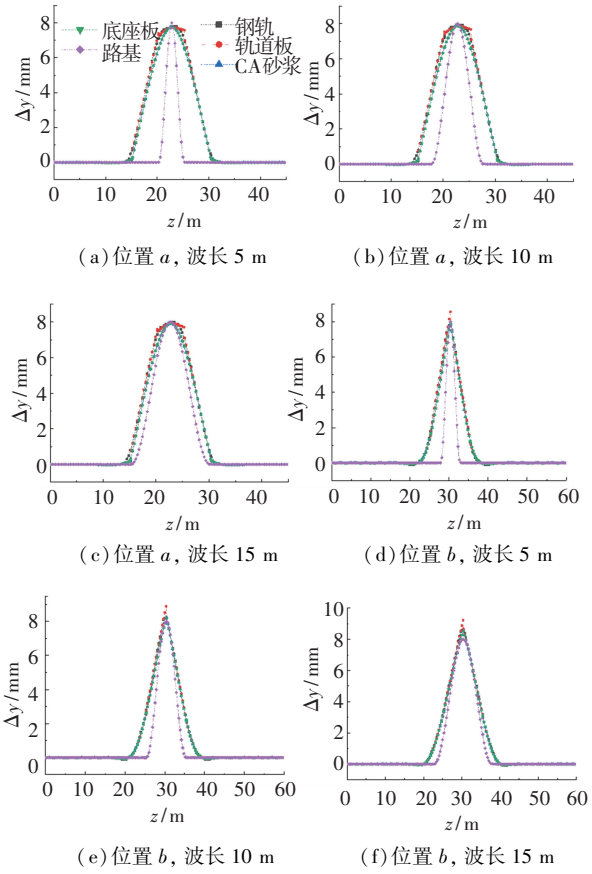


图 8　冻胀波长与轨道结构层竖向变形关系

Fig.8　Relation between frost heaving wavelength and vertical deformation of track structures

轨道不平顺传递规律受路基冻胀波长影响较大. 随着波长的增加，轨道纵向不平顺与冻胀波形趋于协调一致. 在冻胀波长较小时，轨道不平顺波长要大于局部冻胀波长，随冻胀波长的增加，二者趋向一致. 轨道板与砂浆层之间及底座板与基床表层之间均存在显著差异. 结合图 6，这将导致单元轨道板的变形翘曲及底座板下离缝. 随着冻胀波长的增大，轨道结构变形将会与基床变形相协调. 当高速铁路路基发生冻胀变形时会对无砟轨道结构产生一定范围的影响，不同路基冻胀工况下轨道结构变形影响范围见表 4.

由表 4 可以得到：当冻胀发生于位置 a（板中冻胀）时，冻胀波长在 15 m 以内，冻胀变形均发生在 1 块底座板正下方，波长与峰值的影响有限，轨道结构变形受影响范围基本限定在底座板长度范围内. 当路基冻胀发生于位置 b（板缝冻胀）时，冻胀对轨道结构变形的影响范围呈现出与冻胀波长、峰值十分紧密的关系. 轨道结构变形受影响范围随波长和峰

值的增加均在增大. 当冻胀峰值小于 8 mm,板缝冻胀对轨道结构变形影响范围小于板中冻胀情况;峰值大于 8 mm 后,呈现出相反的规律. 因此,短波冻胀作用下大波峰时板缝冻胀对轨道结构变形范围呈现更加显著的影响.

表 4 冻胀对轨道结构变形影响长度

Tab.4 Influence range of track structure deformation under frost heaving

工况	波长/m	不同冻胀峰值的轨道变形影响长度/m		
		5 mm	8 mm	15 mm
板中冻胀	5	13.8	14.2	14.8
	10	14.3	14.4	14.9
	15	14.6	14.7	14.9
板缝冻胀	5	11.1	13.2	15.8
	10	13.3	15.5	17.7
	15	15.2	17.4	19.2

3.2 轨道板与砂浆层离缝规律

路基的冻胀拱起将导致轨道板脱空、砂浆层离缝. 考虑砂浆粘结强度衰减,轨道板刚度保持不变,分析不同冻胀峰值对轨道板-砂浆层离缝影响,如图 9 所示.

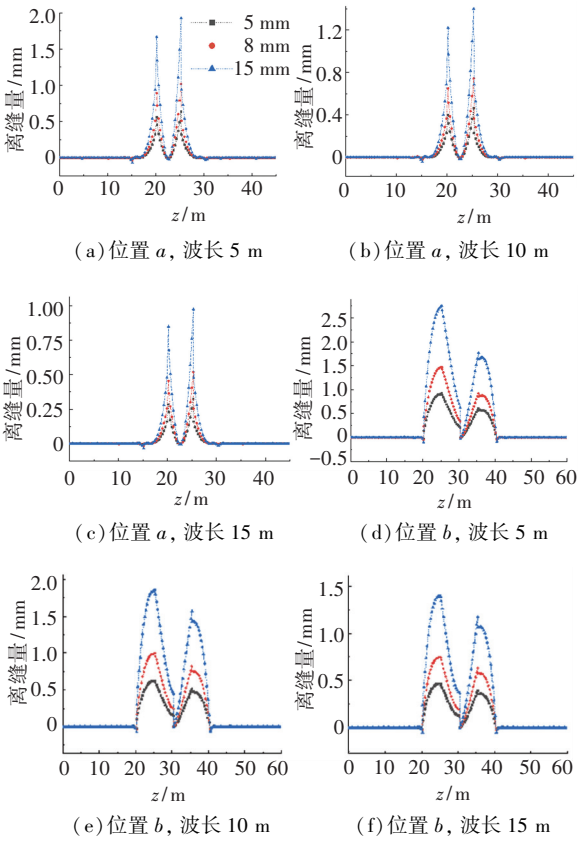


图 9 不同冻胀峰值对轨道板-砂浆层离缝影响

Fig. 9 Effect of frost heaving amplitude on interface crack between track slab and mortar layer

由图 9 中可以看出:轨道板下离缝量沿纵向渐增,靠近冻胀中心逐渐减小,总体呈“M”型,近似对称分布,冻胀中心不发生离析现象. 固定冻胀波长情况下,随着冻胀峰值的增加,层间离缝量显著增加,呈放大趋势,冻胀峰值对离缝具有显著影响. 冻胀发生在位置 a 时,离缝最大值相距 5 m,即单块轨道板的长度,由此可见,冻胀发生在板中时,冻胀峰值处轨道板两端部产生最大翘曲离缝,从而验证了图 6(a)中轨道结构的变形规律. 与位置 a 不同,冻胀发生在位置 b 时,由于凸型挡台、环形树脂具有一定粘结能力,冻胀中心处离缝量发生随机骤变,但在中心处依然产生约 0.5 mm 离缝,与图 6(b)相一致. 冻胀波长 5 m 时最大离缝发生在距冻胀中心 4 m 左右,且波长增加,相对距离随之增加. 不同冻胀波长下,随着波长的增加,离缝量减小明显,对应冻胀位置 a、位置 b 降幅分别为 46.2%、48.7%,短波冻胀下冻胀波长增大对离缝现象的减缓有显著贡献.

3.3 底座板与基床表层离缝规律

路基冻胀区结构离缝是主要整治关注对象,底座板与基床表层之间的离缝一方面增加了无缝线路轨道结构的不稳定性,加大低温环境轨道结构发生上拱的几率;另一方面,冻胀作用下层间使粘结性能向恶性发展,影响行车舒适性和轨道耐久性. 不同路基冻胀峰值对底座板-路基离缝影响如图 10 所示.

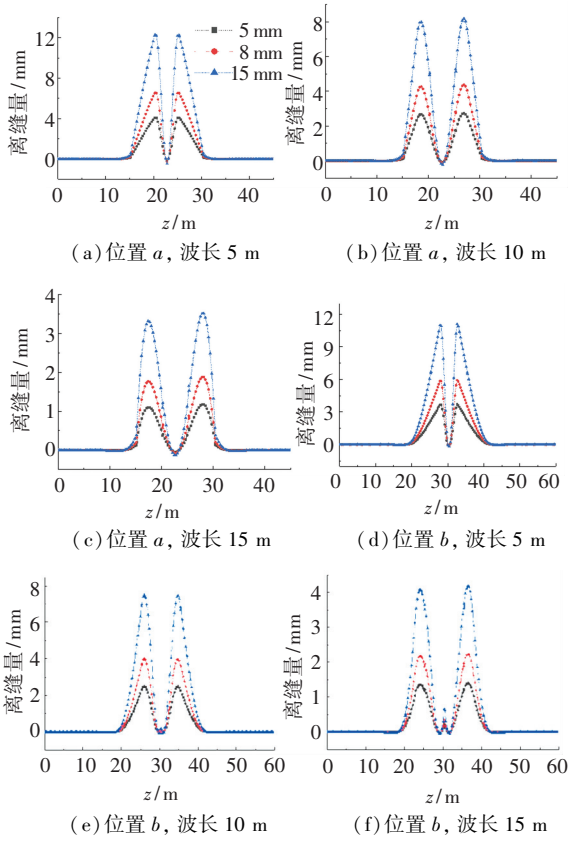


图 10 不同冻胀峰值对底座板-基床表层离缝影响

Fig.10 Effect of frost heaving amplitude on interface crack between baseplate and subgrade

由图 10 可知，各冻胀变形工况下底座板与基床表层产生不同程度的离缝现象. 表 5 列举出冻胀各工况下底座板和路基之间的离缝量最大值.

表 5　冻胀变形下底座板与路基离缝量最大值

Tab. 5　Maximum interface crack between baseplate and subgrade under frost heaving

工况	波长/m	不同冻胀峰值的最大离缝量/mm		
		5 mm	8 mm	15 mm
板中冻胀	5	4.11	6.56	12.31
	10	2.68	4.26	7.99
	15	1.12	1.77	3.32
板缝冻胀	5	3.41	6.11	11.19
	10	2.51	4.12	7.52
	15	1.33	2.21	4.32

根据图 10，对比表 5 中离缝量最大值 f_{max} 可知：冻胀波长一定时，随着冻胀峰值的增加离缝量显著增大，脱空现象加剧；冻胀峰值一定时，随着冻胀波长的增大，路基变形曲率越来越小，曲线平缓，底座板与路基之间离缝量大幅减小. 以上分析说明冻胀波长越小、峰值越大，无砟轨道脱空现象越严重. 相对于板中冻胀（位置 a）而言，板缝冻胀（位置 b）时不同波长下最大离缝量增幅均大于其对应始末峰值增幅，且随波长的增加底座板伸缩缝处发展离缝，离缝量不断增大. 板缝冻胀对底座板离缝现象具有更加显著的影响.

3.4　底座板下离缝纵向位置分布规律

为充分研究底座板离缝开展规律，分别统计路基冻胀变形各情况下底座板离缝量最大值位置相对路基冻胀中心距离，见表 6. 其中，L_f 为底座板离缝量最大值位置相对路基冻胀中心距离，L_0 为路基冻胀波长.

表 6　离缝量最大值位置相对路基冻胀中心距离

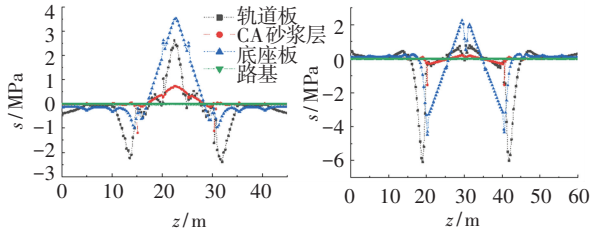
Tab.6　Distance from the position of maximum interface crack to the center of subgrade frost heaving

工况	波长/m	L_f/L_0	不同冻胀峰值的相对中心距离/m		
			5 mm	8 mm	15 mm
板中冻胀	5	0.46	4.11	6.56	12.31
	10	0.38	2.68	4.26	7.99
	15	0.35	1.12	1.77	3.32
板缝冻胀	5	0.44	3.41	6.11	11.19
	10	0.41	2.51	4.12	7.52
	15	0.43	1.33	2.21	4.32

根据表 6 统计可以看到，冻胀波长一定时，底座板与路基离缝最大值位置 L_f 基本一致，与冻胀波作用位置、冻胀峰值均没有相关性；冻胀峰值一定时，随冻胀波长增加，L_f 显著增大，波长影响巨大. 另外，相较于板中冻胀，板缝冻胀时 L_f 更大，这与表 4 分析的结果“板缝冻胀对轨道结构变形范围呈现更加显著的影响”相契合.

4　路基冻胀对轨道结构受力的影响

受路基冻胀下基床表层局部上拱的影响，底座板与轨道板结构均要产生受迫性弯曲变形，纵向受力较复杂，图 11 为冻胀波长为 10 m、冻胀峰值为 8 mm下轨道结构纵向应力分布曲线.



（a）位置 a　　（b）位置 b

图 11　轨道结构层纵向应力分布规律

Fig.11　Longitudinal stress distribution of track structures

在图 11 中可见，在板中冻胀（位置 a）时，冻胀中心区域轨道板与底座板上表面受最大拉应力，在冻胀波脚处受到最大弯矩与压应力；在板缝冻胀（位置 b）时，伸缩缝两侧底座板端部上表面受到最大弯矩与拉应力，在冻胀波脚处受最大压应力. 相对于轨道板，由于底座板直接承受基床上拱影响，其最大拉应力也最大；相对于板缝冻胀，冻胀发生于底座板板中时结构受力更显著，影响最大.

相比结构所受到的压应力，无砟轨道混凝土结构受拉应力影响更为显著，表 7、8 给出各冻胀情况下轨道板、底座板拉应力最大值.

表 7　轨道板最大拉应力

Tab.7　Maximum tensile stress of track slab

工况	波长/m	不同冻胀峰值的轨道板最大拉应力/MPa		
		5 mm	8 mm	15 mm
板中冻胀	5	2.75	4.11	5.43
	10	2.43	2.62	4.71
	15	1.73	2.42	3.53
板缝冻胀	5	0.65	0.98	1.34
	10	0.53	0.78	0.94
	15	0.37	0.55	0.72

表 8 底座板最大拉应力

Tab.8 Maximum tensile stress of baseplate

工况	波长/m	不同冻胀峰值的底座板最大拉应力/MPa		
		5 mm	8 mm	15 mm
板中冻胀	5	2.93	4.97	5.64
	10	2.22	3.51	4.56
	15	1.87	2.71	3.78
板缝冻胀	5	1.54	2.33	3.67
	10	1.43	2.12	3.61
	15	1.27	1.93	3.49

由表 7、8 中可以看到,轨道板与底座板结构最大拉应力随冻胀变形的规律是一致的,均随冻胀峰值的增加而增大,随冻胀波长的增大而迅速衰减,且底座板所受拉应力均大于轨道板. 在冻胀波长较小、峰值较大的情况下,轨道板和底座板的最大拉应力都出现高于混凝土材料抗拉强度的现象,表明路基短波冻胀变形对底座板伤损影响最大,故在严寒地区需强化底座板的设计.

以上对短波冻胀变形一系列的计算结果表明,路基冻胀对轨道结构变形、静力学性能的影响非常显著. 在冻胀波长较小时,不仅引起轨道板-砂浆层、底座板-基床表层较大的离缝量,还会引起混凝土轨道板和底座板较大的拉应力,导致轨道板和底座板悬吊情况下行车动力效应的放大、孔隙水的浸入以及 CRTS Ⅰ型无砟轨道结构的进一步伤损恶化,从而对路基不均匀冻胀控制提出了更高的理论要求与工程监测.

5 结 论

1)冻胀由路基传递至无砟轨道结构,轨道受迫不平顺与冻胀波形基本一致. 短波冻胀下,无砟轨道结构变形、离缝及受力均随冻胀波长的减小、冻胀峰值的增加而增大.

2)无砟轨道不平顺特性与冻胀位置有关. 底座板板中冻胀时,轨道变形极值与冻胀峰值接近,轨道结构不平顺影响范围基本限定在底座板长度内;底座板板缝冻胀时,轨道变形在冻胀中心处有明显增大,结构变形范围随波长、峰值的增加均在增大.

3)冻胀峰值对轨道结构层间离缝具有显著影响,冻胀波长增大对离缝现象的减缓有显著贡献. 另外,随冻胀波长增加,离缝量最大值位置相对路基冻胀中心距离显著增大,冻胀发生于底座板伸缩缝时离缝影响更大.

4)冻胀中心轨道板与底座板上表面受最大拉应力,在冻胀波脚处受最大压应力. 相对轨道板,底座板承受更大拉应力. 底座板板中冻胀时结构受力更大. 冻胀波长较小、峰值较大时,轨道板、底座板抗拉强度不足,冻胀变形对底座板损伤最大.

5)从轨道结构变形、离缝大小角度考虑,冻胀作用最不利情况为底座板伸缩缝冻胀. 从轨道结构强度、静力学特性角度考虑,冻胀作用最不利情况为底座板板中冻胀. 建议冻胀检修限值为波长 10 m、峰值 5 mm.

参考文献

[1] 赵国堂, 赵磊, 张鲁顺. 基于高速铁路路基冻胀的无砟轨道受力特征[J]. 铁道工程学报, 2017, 34(8): 53
ZHAO Guotang, ZHAO Lei, ZHANG Lushun. Mechanical characteristics of ballastless track under subgrade frost heaving in high-speed railway[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2017, 34(8): 53

[2] MA F, XI R, XU N. Analysis of railway subgrade frost heave deformation based on GPS[J]. Geodesy and Geodynamics, 2016, 7(2): 143

[3] 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
ZHAO Guotang, LIU Xiubo, GAO Liang, 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

[4] 杨国涛, 高亮, 刘秀波, 等. 基于动力分析的 CRTSⅢ板式无砟轨道路基冻胀控制标准研究[J]. 铁道学报, 2017,39(10): 110
YANG Guotao, GAO Liang, LIU Xiubo, et al.Research on division standard of subgrade frost heaving for CRTS III slab track based on dynamic analysis[J]. Journal of the China Railway Society, 2017, 39(10): 110

[5] PIGEON M, PLEAU R. Durability of concrete in cold climates[M]. London: CRC Press, 2014

[6] SOROUSHIA P, NAGI M, OKWUEGBU A. Freeze-thaw durability of lightweight carbon fiber reinforced cement composites[J]. Materials Journal, 1992, 89(5): 491

[7] 徐存东, 程昱, 王荣荣, 等. 带初始冻融损伤的混凝土材料受盐冻作用下性能劣化分析[J]. 工程科学与技术, 2019, 51(1): 17
XU Cundong, CHENG Yu, WANG Rongrong, et al. Analysis of performance deterioration of concrete material with initial freeze-thaw damage under salt-freezing condition[J]. Advanced Engineering Sciences, 2019, 51(1): 17

[8] 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
ZHAO Guotang. 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

[9] 李娟. 高速铁路 CRTS Ⅰ型板式无砟轨道结构受路基冻胀的影响研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2016
LI Juan. Study on the influence for the CRTS I slab track induced by subgrade frost heaving[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016

[10] 郭毅. 高速铁路路基冻胀变形引起的轨道结构变形特性及其对

行车的动力影响研究[D]. 成都：西南交通大学，2016
GUO Yi. Study on the effect of subgrade frost heaving on the deformation properties of track structure and its vehicle dynamic behavior in high-speed railway[D]. Chengdu：Southwest Jiaotong University，2016
[11]刘学毅，苏成光，刘丹，等. 轨道板与砂浆粘结试验及内聚力模型参数研究[J]. 铁道工程学报，2017，34(3)：22
LIU Xueyi，SU Chengguang，LIU Dan，et al. Research on the bond properties between slab and CA mortar and the parameters study of cohesive model[J]. Journal of Railway Engineering Society，2017，34(3)：22
[12]蔡小培，梁延科，谭诗宇，等. 路基冻胀地区 CRTS Ⅰ型板式无砟轨道结构变形与离缝特征分析[J]. 北京交通大学学报，2017，41(1)：7
CAI Xiaopei，LIANG Yanke，TAN Shiyu，et al. Deformation and seam characteristics analysis of CRTS I slab ballastless track in subgrade frost heaving zone[J] Journal of Beijing Jiaotong University，2017，41(1)：7
[13]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
WU Zhonglun. Analysis of track irregularity and dynamic response for the influence of high speed railway subgrade frost heaving[D]. Beijing：Beijing Jiaotong University，2015
[14]宋宏芳，刘晓贺，李佰林. 季节性冻土区高速铁路新型防冻胀路基力学特性研究[J]. 铁道学报，2018，40(11)：98
SONG Hongfang，LIU Xiaohe，LI Bailin. Study on new anti-frost heaving filling material and structure mechanical properties of high-speed railway subgrade in seasonal frozen soil region[J]. Journal of the China Railway Society，2018，40(11)：98
[15]杨俊斌，刘学毅，刘永孝，等. Ⅰ型轨道板端离缝对轨道结构及车辆动力特性的影响[J]. 西南交通大学学报，2014，49(3)：432
YANG Junbin，LIU Xueyi，LIU Yongxiao，et al. Influence of seam in type I slab ends on dynamic characteristics of track and vehicle[J]. Journal of Southwest Jiaotong University，2014，49(3)：432
[16]郭亮武. 严寒地区路基冻胀下车辆—无砟轨道系统的动力学行为研究[D]. 北京：北京交通大学，2017
GUO Liangwu. Study on dynamic behavior of vehicle-slab track system under the subgrade frost heaving in cold region[D]. Beijing：Beijing Jiaotong University，2017
[17]高速铁路设计规范：TB 10621—2014[S]. 北京：中国铁道出版社，2014
Code for design of high speed railway：TB 10621—2014[S]. Beijing：China Railway Publishing House，2014
[18]ZENG X H，XIE Y J，DENG D H，et al. A study of the dynamic mechanical properties of CRTS I type CA mortar[J]. Construction and Building Materials，2016，112：93

（编辑　魏希柱）

（上接第 109 页）

[13]商怀帅，欧进萍，宋玉普.混凝土结构冻融损伤理论及冻融可靠度分析[J].工程力学，2011，28(1)：70
SHANG Huaishuai，OU Jinping，SONG Yupu. The freeze-thaw damage theory and freeze-thaw reliability analysis of concrete structures[J]. Engineering Mechanics，2011，28(1)：70
[14]LAWRENCE P，CYR M，RINGOT E. Mineral admixtures in mortars：effect of inert materials on short-term hydration[J]. Cement and Concrete Research，2003，33(12)：1939
[15]CYR M，LAWRENCE P，RINGOT E. Mineral admixtures in mortars：quantification of the physical effects of inert materials on short-term hydration[J]. Cement and Concrete Research，2005，35(4)：719
[16]马映昌，刘海峰，张明虎.低温作用下沙漠砂替代率和粉煤灰掺量对混凝土抗压强度影响[J].工业建筑，2020，50(5)：81
MA Yingchang，LIU Haifeng，ZHANG Minghu. Effects of desert sand replacement rate and fly ash content on the compressive strength of concrete under low temperature[J]. Industrial Construction，2020，50(5)：81
[17]中华人民共和国住房和城乡建设部.混凝土结构设计规范：GB 50010—2010[S].北京：中国建筑工业出版社，2015
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Specification for concrete structure design：GB 50010—2010 [S]. Beijing：China Building Industry Press，2015
[18]吴波，刘璐，赵霄龙.自密实再生混合混凝土的单轴受压试验研究[J].建筑结构学报，2016，37(增刊 2)：73
WU Bo，LIU Lu，ZHAO Xiaolong. Study on uniaxial compression test of self-compacting recycled concrete[J]. Journal of Building Structures，2016，37(S2)：73
[19]SAGRIN M. Stress-stain relationship for concrete and the analysis of structural concrete sections[M]. Waterloo：University of Waterloo，1971
[20]HOGNESTAD E，HANSON N W，MCHENRY D. Concrete stress distribution in ultimate strength design[J]. ACI Journal，1955，52(4)：455
[21]过镇海.混凝土的强度与变形-试验基础与本构关系[M].北京：清华大学出版社，1997
GUO Zhenhai. Strength and deformation of concrete：experimental basis and constitutive relationship[M]. Beijing：Tsinghua University Press，1997

（编辑　魏希柱）