

文章编号: 1001-4632 (2026) 02-0033-12

引用格式: 赵一馨, 宋慧来, 邵亚建, 等. 铁路隧道内无砟轨道上拱变形规律试验研究[J]. 中国铁道科学, 2026, 47(2): 33-44.

Citation: ZHAO Yixin, SONG Huilai, SHAO Yajian, et al. Experimental Study on Uplift Deformation Patterns of Ballastless Track in Railway Tunnels [J]. China Railway Science, 2026, 47 (2): 33-44.

铁路隧道内无砟轨道上拱变形规律试验研究

赵一馨¹, 宋慧来², 邵亚建³, 赵磊⁴

1. 中国铁道科学研究院集团有限公司 铁路基础设施检测中心, 北京 100081;
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. 河北工业大学 土木与交通学院, 天津 300401;
4. 中国铁道科学研究院集团有限公司 铁道建筑研究所, 北京 100081)

摘要: 铁路隧底结构在高地下水压力与围岩膨胀作用下易产生隆起变形, 从而引发轨道不平顺, 影响高速列车的安全平稳运行。为探究铁路隧道内无砟轨道上拱变形规律, 基于相似准则构建无砟轨道-隧底结构相似模型, 并借助 3D 打印技术制备相应物理模型, 采用特制加载工装对隧底荷载进行模拟与控制。结果表明: 在隧底荷载作用下, 各结构层表面均受拉, 且中心水沟表面受拉最为显著; 各结构层的横向应力明显大于纵向应力, 使得结构更易沿纵向开裂, 与现场实际裂纹分布特征相吻合; 施工缝处的变形挤出效应显著, 中心水沟这一薄弱环节导致隧道中线的变形量整体高于道床板中线, 随着隧底荷载的增加, 变形幅值基本上呈线性增长, 两者差异进一步拉大; 仰拱欠厚与曲率减小均显著加剧隆起变形的产生与传递, 其中仰拱厚度的减小导致上拱幅值呈幂函数增大。研究结论为隧底结构隆起病害的控制与结构优化设计提供了一定参考。

关键词: 高速铁路; 无砟轨道; 隧底结构隆起; 3D 打印; 模型试验

中图分类号: U213.2⁺44 **文献标识码:** A

doi: 10.3969/j.issn.1001-4632.2026.02.04

近年来, 随着我国铁路建设重点向西部转移, 高速铁路隧道往往穿越复杂地质区域, 隧址区地质条件恶劣, 隧底结构的长期稳定性面临严峻挑战^[1]。其中, 隧底结构隆起变形作为一种普遍且危害严重的病害现象, 是引起轨道不平顺并威胁行车安全的重要因素之一^[2-4]。通常情况下, 高铁隧道在服役期内围岩应力较为平衡, 而高地下水压力和膨胀力则成为导致隧底结构隆起变形的主要驱动力。因此, 如何准确、深入地分析高地下水压力和围岩膨胀力对铁路隧道内无砟轨道上拱变形的影响规律, 是确保行车安全性的关键前提。

国内外相关研究与工程实践表明, 由高地下水压力和围岩膨胀力诱发的隧底结构隆起病害, 在奥地利、瑞士、韩国、中国、法国等国家及北美地区

均有发生^[5-10]。其中, 高地下水压力的形成, 往往与隧址区复杂的水文地质条件、隧道排水系统性能退化密切相关。在岩溶发育的隧道中, 极端降雨可致地下水快速汇集于隧底区域, 若排水系统因方解石沉淀、化学侵蚀或机械损坏而失效或堵塞, 水压会随之显著升高^[5-7]。另一方面, 围岩膨胀力主要源于含膨胀土的围岩在地下水环境变化下发生吸水膨胀, 从而对隧底结构施加附加应力^[11-14]。

在已有研究基础上, 学者们主要通过模型试验与数值计算手段, 对高地下水压力和围岩膨胀力引发的隧底结构隆起变形进行模拟分析。这些方法通常包括 2 类: 一类是直接模拟水压场和膨胀力场以计算隧底结构隆起变形^[11, 15-16]; 另一类则是将水压与膨胀力等效为荷载^[17-19], 基于荷载-结构模型

收稿日期: 2025-10-19; 修订日期: 2026-01-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52522221)

第一作者: 赵一馨 (1994—), 女, 安徽淮南人, 助理研究员。E-mail: zhaoyixin@rails.com

通讯作者: 宋慧来 (1994—), 男, 河北秦皇岛人, 讲师。E-mail: songhuilai@ecjtu.edu.cn

开展变形分析。然而,这2类研究通常从隧道全断面系统的整体视角出发,模型在几何尺寸、边界条件及影响因素方面复杂多样,从而难以突出隧底结构的力学特征。特别是在物理模型试验中,全断面模型的制作、加载与监测均相对复杂,难以对关键参数进行高精度定量研究。为此,赵国堂等^[20]提出了铁路隧道内无砟轨道上拱变形计算模型轻量化构建方法,但尚未开展试验研究,无砟轨道上拱变形的实际物理规律还不清晰。

基于上述问题,首先根据相似准则,建立道床板-仰拱系统相似模型,以探究隧底结构的力学行为。在此基础上,利用3D打印技术,针对隧底仰拱厚度不足、曲率不达设计标准等典型缺陷,制作对应的物理模型。通过设计专门的加载工装模拟隧底荷载,并借助分辨率高达 $0.5\ \mu\text{m}$ 的激光位移传感器,实现对物理模型位移变化的高精度监测。同时,结合平面应力传感器和应变片的测量结果,对模型的受力与变形特征进行综合分析。最后,通过分析试验数据阐述铁路隧道内无砟轨道上拱变形的实际物理规律,为隧底上拱病害的控制提供一定参考。

1 相似物理模型的设计及制作

1.1 相似准则的推导

本试验针对无砟轨道-隧底结构系统,研究其在底部承受局部均布荷载作用下的变形规律。针对这一过程,涉及的物理量有结构的几何尺寸 l 、结构承受的面荷载 q 、材料密度 ρ 、结构的竖向位移 s 、结构的应力 σ 、结构的应变 ε 、材料的弹性模量 E 和材料的抗拉极限强度 σ_f 。假定上述8个物理量的函数关系 f 为

$$f(l, q, \rho, s, \sigma, \varepsilon, E, \sigma_f) = 0 \quad (1)$$

由于上述物理量不涉及时间量纲,故选取力的量纲 F 和长度的量纲 L 作为基本量纲,则上述物理量对应的量纲见表1。

表1 各物理量的量纲

物理量	量纲	物理量	量纲
l	L	σ	FL^{-2}
q	FL^{-2}	ε	F^0L^0
ρ	FL^{-3}	E	FL^{-2}
s	L	σ_f	FL^{-2}

选取 l 和 E 作为基本物理量,由 π 定理可得

$$F(\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5, \pi_6) = 0 \quad (2)$$

其中,

$$\pi_1 = \frac{q}{l^{a_1} E^{b_1}}$$

$$\pi_2 = \frac{\rho}{l^{a_2} E^{b_2}}$$

$$\pi_3 = \frac{s}{l^{a_3} E^{b_3}}$$

$$\pi_4 = \frac{\sigma}{l^{a_4} E^{b_4}}$$

$$\pi_5 = \frac{\varepsilon}{l^{a_5} E^{b_5}}$$

$$\pi_6 = \frac{\sigma_f}{l^{a_6} E^{b_6}}$$

$$\pi_1 \text{ 到 } \pi_6 \text{ 的量纲分别为 } \frac{FL^{-2}}{L^{a_1} F^{b_1} L^{-2b_1}}, \frac{FL^{-3}}{L^{a_2} F^{b_2} L^{-2b_2}},$$

$$\frac{L}{L^{a_3} F^{b_3} L^{-2b_3}}, \frac{FL^{-2}}{L^{a_4} F^{b_4} L^{-2b_4}}, \frac{F^0 L^0}{L^{a_5} F^{b_5} L^{-2b_5}}, \frac{FL^{-2}}{L^{a_6} F^{b_6} L^{-2b_6}}.$$

解得: $a_1=0, b_1=1; a_2=-1, b_2=1; a_3=1, b_3=0; a_4=0, b_4=1; a_5=b_5=0; a_6=0, b_6=1$ 。

将计算结果代入式(2),可以得到模型试验的相似准则为: $\pi_1 = \frac{q}{E}; \pi_2 = \frac{\rho}{l^{-1}E}; \pi_3 = \frac{s}{l}; \pi_4 = \frac{\sigma}{E}; \pi_5 = \varepsilon; \pi_6 = \frac{\sigma_f}{E}$ 。从而可得原型与模型的比例关系式为

$$\begin{cases} \frac{q_m}{E_m} = \frac{q_p}{E_p} \\ \frac{\rho_m}{l_m^{-1} E_m} = \frac{\rho_p}{l_p^{-1} E_p} \\ \frac{s_m}{l_m} = \frac{s_p}{l_p} \\ \frac{\sigma_m}{E_m} = \frac{\sigma_p}{E_p} \\ \varepsilon_m = \varepsilon_p \\ \frac{\sigma_{f_m}}{E_m} = \frac{\sigma_{f_p}}{E_p} \end{cases} \quad (3)$$

式中:角标 m 表示模型, p 表示原型。

根据式(3)可知,当将无砟轨道-隧底结构系统原型的 E 和 l 均缩小 n 倍时,相似模型的 q, s, σ 和 σ_f 均缩小 n 倍,而 ρ 和 ε 保持不变。

1.2 相似模型的设计

根据文献[20]提出的铁路隧道内无砟轨道上拱变形计算模型构建方法,可将隧底结构从整个支护体系中分离出来,独立进行分析。针对高速铁路双线隧道,参考既有通用设计图,设计道床板-

仰拱系统物理模型，并按 1 : 30 的比例进行缩小，其整体示意图和横断面分别如图 1 和图 2 所示。

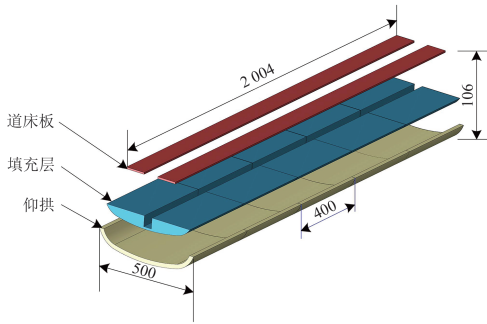


图 1 模型整体示意图 (单位: mm)

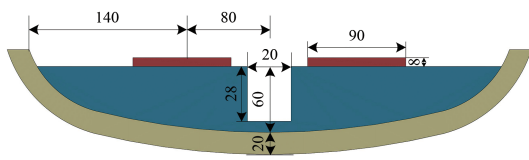


图 2 模型横断面 (单位: mm)

对于无砟轨道及隧底结构材料，仰拱为 C30 钢筋混凝土，填充层为 C20 混凝土，道床板为 C40 混凝土。材料参数根据推导的相似准则进行确定，见表 2。

表 2 各结构层原型与模型材料参数设计值

结构层	密度 / (10 ³ kg · m ⁻³)		弹性模量 / GPa		抗拉强度 / GPa	
	原型	模型	原型	模型	原型	模型
道床板	2.5	2.5	32.5	1.08	2.39	0.080
填充层	2.2	2.2	25.5	0.85	1.54	0.050
仰拱	2.5	2.5	31.5	1.05	2.01	0.067

在仰拱施工缺陷中，厚度不足是常见缺陷之一。根据现场病害点探测结果，以设计厚度 0.6 m 为对照，仰拱平均欠厚可达 0.21 m，最大欠厚达到 0.56 m。为此，工况设计中，仰拱厚度取 0.3~0.6 m，按 1 : 30 的相似比换算为模型厚度，并同步考虑仰拱曲率不足情况。设计工况见表 3。

表 3 模型工况

工况类型	具体工况	模型数量 / 个
正常仰拱	仰拱厚度为 2 cm, 曲率 1/1 980 cm ⁻¹	2
仰拱厚度不足	仰拱厚度为 1.7, 1.3 和 1.0 cm	3
仰拱曲率不足	仰拱曲率减小 40%	1

1.3 基于 3D 打印技术的模型制作

3D 打印技术是指通过连续的物理层叠加，逐层增加材料来实现三维实体的技术，其主要优势在于多材料高精度打印。现有研究表明，3D 打印技术在相似模型的制作过程中，能够实现较高的成型

精度，通常可达到 0.1~0.2 mm^[21]。在隧道工程领域，已有大量研究采用不同类型的材料成功制作了隧道模型^[22-23]。基于此，通过 3D 打印技术制作隧底结构物理模型，以提高模型精度，减少试验误差。

1.3.1 模型材料

相似模型主要包括道床板、填充层与仰拱 3 种结构层。基于对材料力学性能与可打印性能的综合考量，选用石英砂、硅灰、粉煤灰、水泥等材料作为基础原材料，如图 3 所示。各结构层的具体材料质量配比见表 4。其中，石英砂比重为 2.67，粒径小于 0.42 mm；粉煤灰比重为 2.26，粒径小于 55 μm；所用硅灰中二氧化硅含量不低于 85%。此外，为模拟仰拱中的钢筋，本研究根据屈服强度等效原则，以玻璃纤维网布代替钢筋。

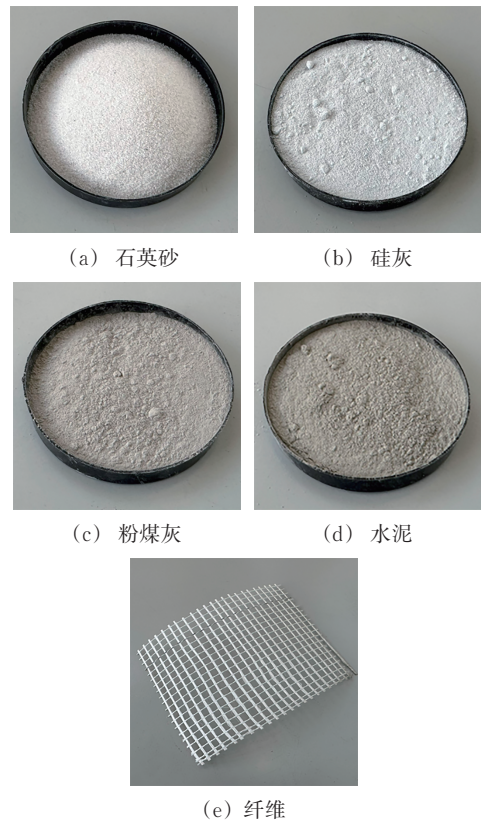


图 3 模型配制材料

表 4 模型材料质量配比

结构层	石英砂:硅灰:粉煤灰:水泥
道床板	50:23:43:2
填充层	50:33:40:1.2
仰拱	45:25:39:1.8

在制备用于 3D 打印的水泥基材料时，其可打印性是评估材料性能的关键指标，主要由材料的流

动度和凝结时间决定。采用跳桌试验对水泥浆液的流动度进行测定，并利用维卡仪针入度试验确定材料的凝结时间，测试结果见表5。由表中数据可知，各材料的扩展直径均处于19~22 cm的范围内，浆体的流动特性满足3D打印工艺要求，且初

凝时间最长不超过216 min。

1.3.2 模型制作

为满足模型制备的精度要求，采用增减材协同3D打印系统进行模型制作，如图4所示。该系统由增材机械臂、减材机械臂、增材打印头以及切削减材打印头组成。在制备过程中，增材机械臂搭载增材打印头用于水泥基材料的层叠打印；减材机械臂搭载切削减材打印头用于后续表面精整和几何精度修正。参照表3所列工况参数完成模型打印，打印结果如图5所示。

表5 材料可打印性试验结果

结构层	跳桌试验结果/cm	针入度试验结果/min
道床板	21.3	177
填充层	19.8	216
仰拱	21.5	189

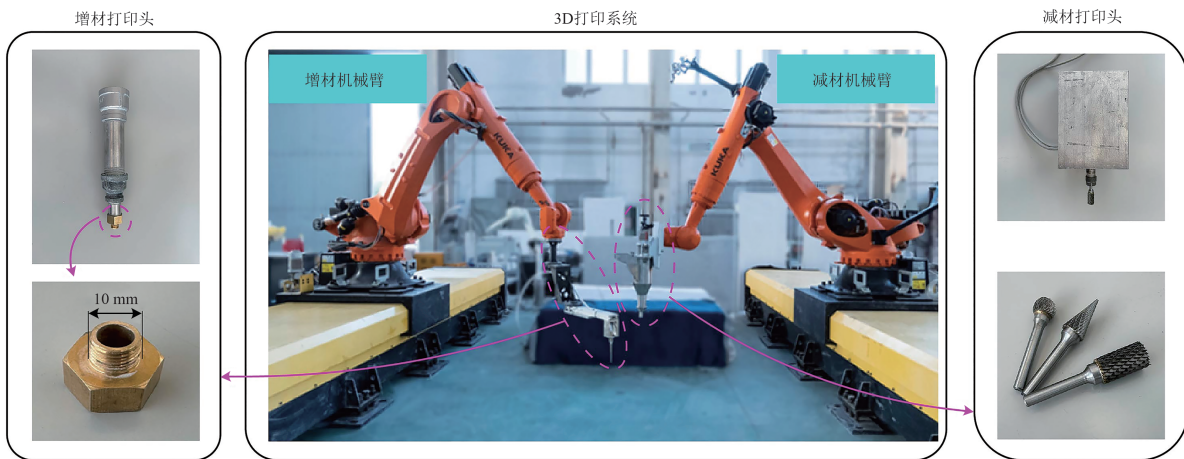


图4 增减材3D打印系统



图5 3D打印模型实物图

表中数据可知，试验所得的力学性能指标与设计值基本一致，满足预定的设计要求。



图6 模型相似材料试样

1.3.3 力学性能试验

为验证3D打印模型的力学性能是否满足设计要求，选用与3D打印材料相同配比的材料制备立方体与圆柱形试样（图6）。随后对制备的试样分别进行单轴压缩试验与劈裂试验，测定材料的弹性模量、抗压强度及抗拉强度，结果汇总成表6。由

表6 相似模型材料参数实测值与设计值对比

结构层	密度/(10 ³ kg·m ⁻³)		弹性模量/GPa		抗拉强度/GPa	
	设计值	实测值	设计值	实测值	设计值	实测值
道床板	2.500	2.480	1.080	1.190	0.080	0.090
填充层	2.200	2.290	0.850	0.880	0.050	0.060
仰拱	2.500	2.530	1.050	1.040	0.067	0.080

2 无砟轨道上拱变形试验设计

2.1 加载方案

基于可调式五面挡板试验机，设计了一套适用

于隧底结构模型的底部加载专用试验装置。图 7 展示了隧底结构物理模型箱及其加载系统的总体设计方案，图 8 则详细呈现了物理模型的实际安装流程。

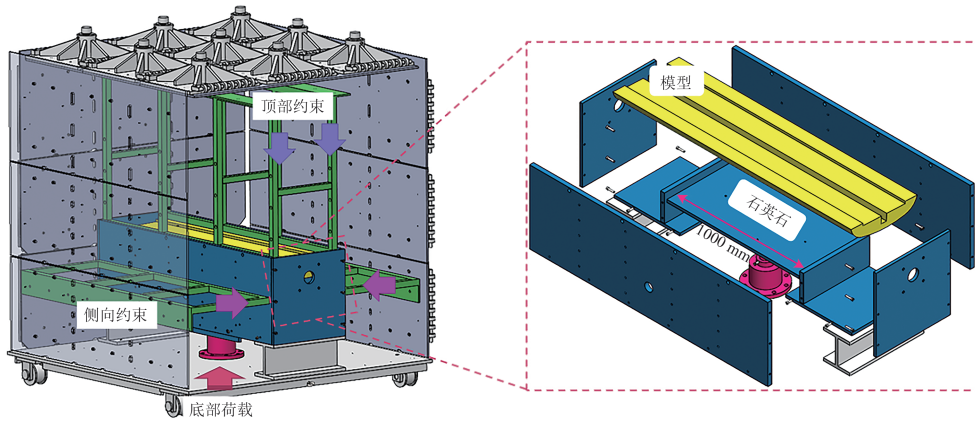


图 7 特制加载工装设计图

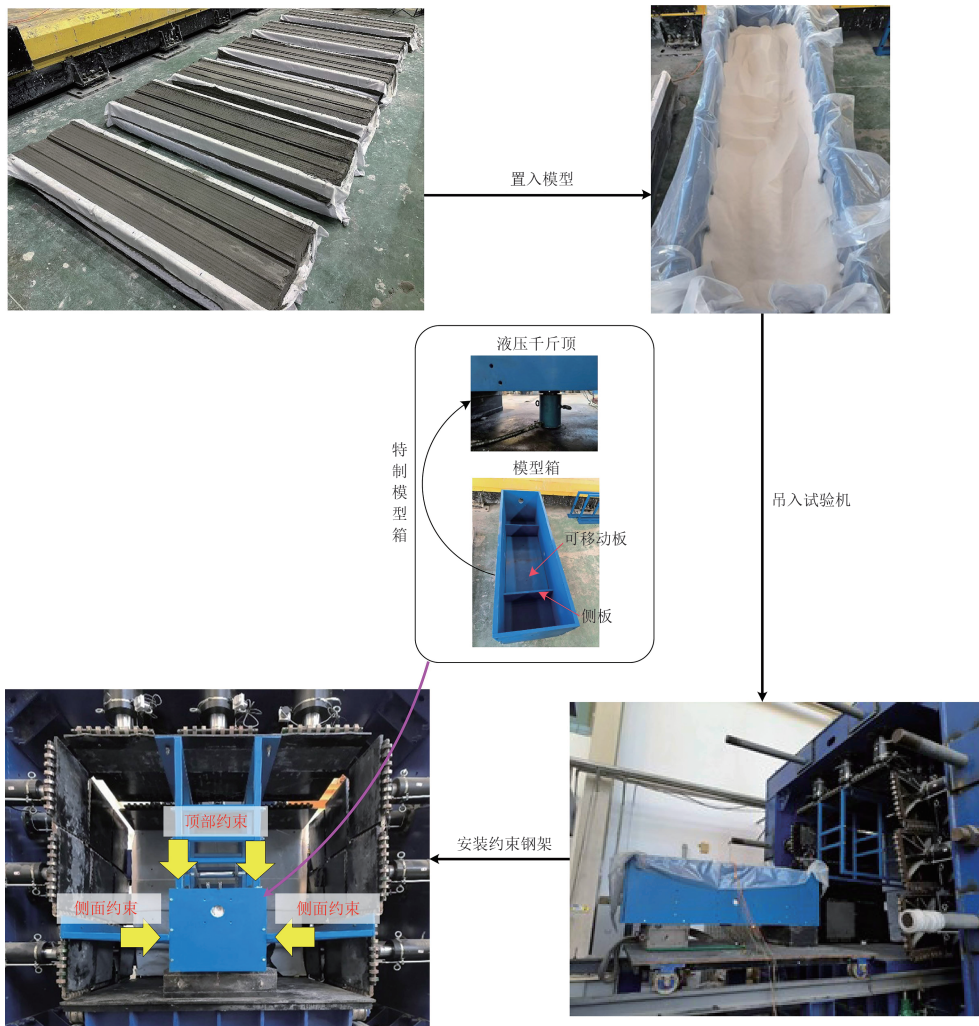


图 8 物理模型安装与加载流程

如图 7 和图 8 所示，采用“一体化成型—精准定位—多向约束—局部加载”的工序实现物理模型

的安装及加载。首先，利用 3D 打印技术一次性整体成型无砟轨道—隧底结构物理模型；随后，按定

位基准将试件置于模型箱指定位置,并在均匀充填的石英砂上实现紧密接触,为模型提供均匀径向支承。完成定位后,整体吊运模型箱至底部轨道并推入伺服试验机,通过刚性钢架及顶、侧反力架构建顶-侧联动的封闭约束体系。千斤顶置于可移动板底部,使得荷载通过“液压千斤顶→可移动加载板→石英砂垫层→物理模型”的传递路径,精准施加于隧底结构模型底部,实现对隧底荷载的精确模拟。

加载历程如图9所示。图中: T 为加载时间; q_0 为预加载阶段施加的荷载水平; q_c 为模型出现宏观开裂时对应的临界荷载。可以看出,整个加载历程分为预加载与匀速加载2个阶段,预加载阶段用于消除装置间隙并检验系统稳定性,匀速加载阶段以恒定速率持续提高底部荷载,直至试件出现宏观开裂。为避免长时间加载导致的应变漂移现象,总加载时间控制在3分钟内。

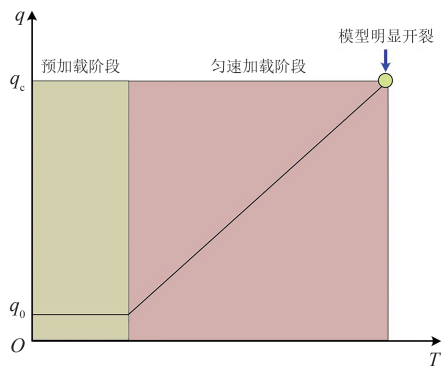


图9 加载曲线

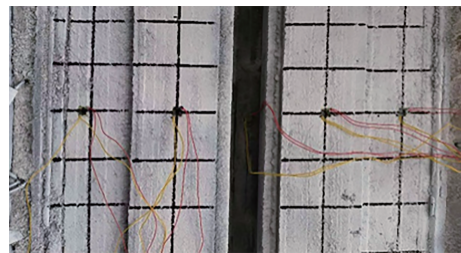
2.2 监测方案

为精确监测模型在加载过程中的应力、应变及位移变化,在模型各关键部位布设平面压力传感器、应变片和激光位移传感器,布设方案如图10所示。其中,平面压力传感器安装于石英砂表面,用以测量隧底荷载值;应变片选用双向直角应变花,布设于道床板、填充层、仰拱及中心水沟等结构层表面和底面,以获取其力学响应;激光位移传感器则置于模型上方,用于记录道床板中线及隧道中线的位移变化曲线,从而实现对模型整体受力与变形特性的综合监控与分析。

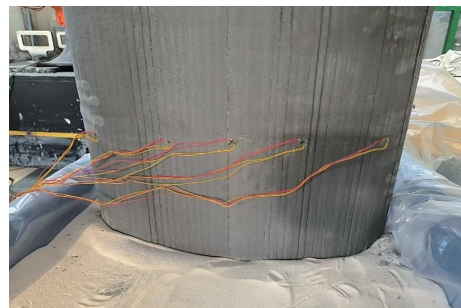
如图11所示,本文配置了2套数据采集设备用于不同类型测量信号的获取。图11(a)为通用型多通道数据采集仪,主要用于采集应变片与平面应力传感器信号,支持多通道同步采集,并通过独立信号调理实现信号的放大、滤波与校正;图11



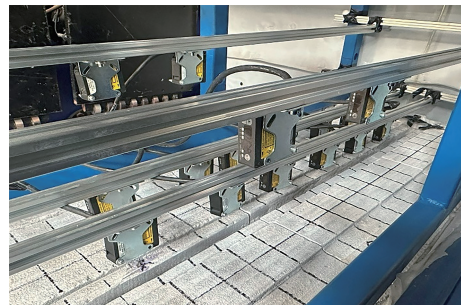
(a) 平面压力传感器



(b) 表面应变片

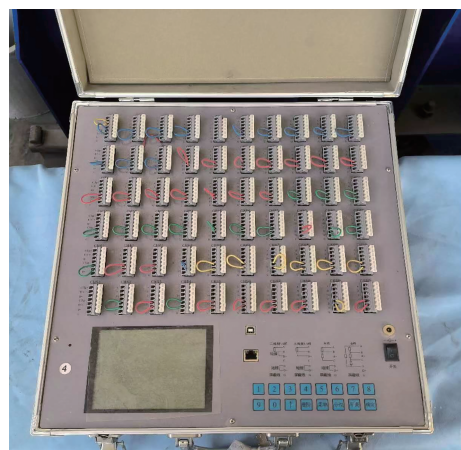


(c) 底面应变片

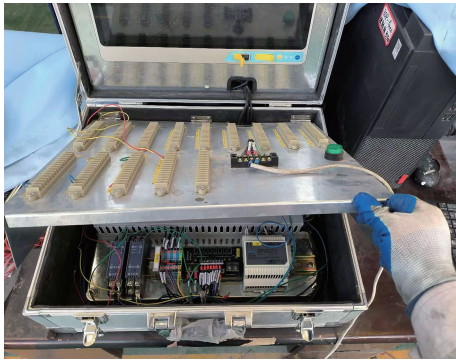


(d) 激光位移传感器

图10 传感器布设方式



(a) 应变及应力采集仪



(b) 位移采集仪

图 11 采集仪器实物图

(b) 为位移数据记录系统，用于记录激光位移传感器输出，实现多测点位移的连续监测与长期稳定存储。两套系统采集数据均可本地保存并通过 USB 接口导出，以支撑后续的数据处理与分析。

3 隧底荷载下结构受力及变形特征

3.1 受力特征

提取道床板、填充层、仰拱和中心水沟的应变数据，并基于隧底荷载 2.5 MPa 条件对各结构层的受力特征进行计算与分析。为直观分析各结构层的受力特征，将所有数据进行归一化处理，并绘制各结构层的受力直方图，如图 12 所示。图 13 为模型开裂后的裂纹分布图。

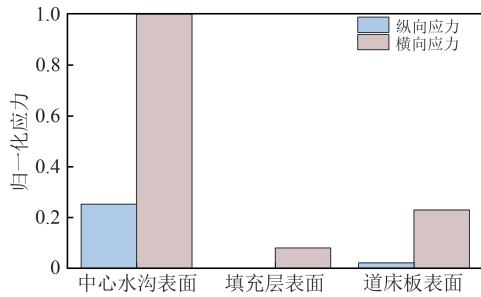


图 12 各结构层归一化应力直方图

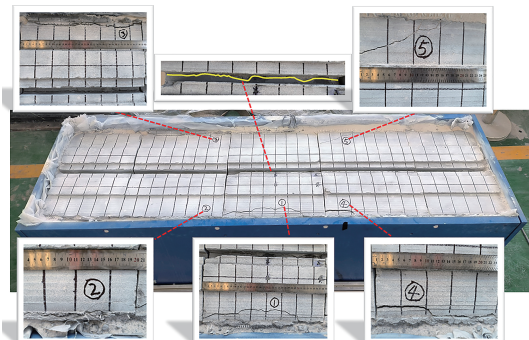
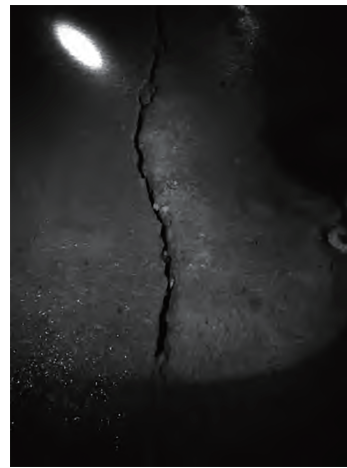


图 13 模型裂纹分布

由图 12 可知：中心水沟表面、填充层表面及道床板表面均呈受拉状态，而仰拱底面则受压；其中，中心水沟表面受拉应力最大；对比纵向与横向应力后发现，横向应力显著大于纵向应力，该结论与图 13 中显示的裂纹分布特征相一致。在图 13 中可见 6 条明显裂纹，其中 5 条位于侧面边界附近，表明该区域存在应力集中；第 6 条纵向裂纹出现在中心水沟表面，这与应力分析结果相吻合。

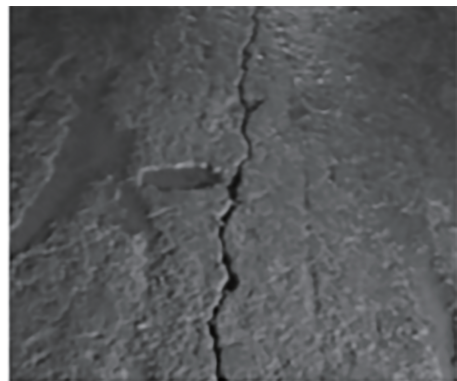
进一步地，现场裂纹图片（图 14）显示裂纹主要分布位置与走向特征与物理模型基本一致，从工程实测角度对试验模型裂纹模式及上述受力分析结论提供了验证支撑。



(a) 病害段 I



(b) 病害段 II



(c) 病害段 III



(d) 病害段Ⅳ

图14 现场调研隧道裂纹分布特征

3.2 变形特征

提取道床板中线和隧道中线的激光位移传感器测量值,分析隧底结构隆起变形的曲线特征。以隧底荷载2.5 MPa的数据为基础,绘制道床板中线和隧道中线的上拱变形曲线,如图15所示。图中:横坐标为沿隧道轴线方向的纵向位置,用于表征各位移测点的相对位置;纵向位置±6和±18 m处为施工缝两侧的成对测点。

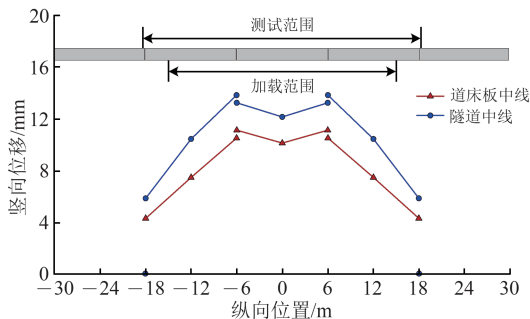


图15 道床板和隧底结构上拱变形曲线

从图15中曲线整体特征来看,道床板中线和隧道中线的上拱变形曲线特征基本一致,均表现为板中央下沉、板端上翘,且在中心板与相邻板的接缝位置出现位移突变,这主要与施工缝处的变形挤出效应有关;随着远离板中心,位移显著减小,并在相邻板的板端趋近于0。从整体的变形量值来看,隧道中线的隆起变形量整体高于道床板中线,表明隆起变形在自下而上的传递过程中出现了衰减现象。这主要是由于隧道中线处存在中心水沟这一薄弱环节,使得隧底结构隆起变形较为显著,而道床板中线下方的整体刚度较大,从而表现出变形衰减现象。

为验证变形曲线的合理性,进行试验结果与现场实测结果的规律性对比。现场实测结果来自某高铁隧底结构严重隆起变形段,是进行现场维修前的

轨道高程测量结果,如图16所示。可以看出,模型试验结果与实测结果的规律性较为一致,均表现出施工缝处出现峰值的变形特征,验证了模型试验的有效性。

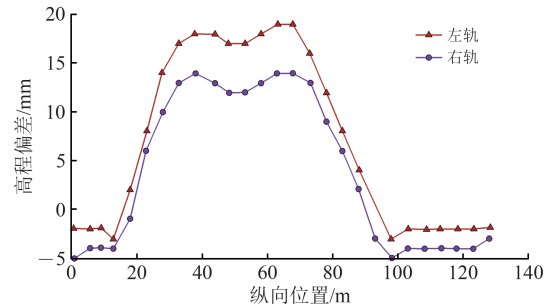


图16 实测轨道高程曲线

4 隧底结构隆起变形幅值影响因素

进一步提取道床板中线和隧道中线的变形幅值,分析隧底荷载、仰拱厚度及曲率的变化对变形幅值的影响规律。

4.1 荷载的影响

图17为隧道中线和道床板中线上拱变形幅值A随隧底荷载q变化曲线。总体来看,在低荷载(如0.5 MPa)下,隧道中线和道床板中线的上拱幅值差异较小,结构变形较为均匀;随着隧底荷载的增加,隧道中线的变形幅值显著高于道床板中线,二者差距逐渐扩大,反映出高荷载条件下结构变形的不均匀性进一步加剧。此外,拟合结果表明,隧道中线和道床板中线的幅值变化均可用线性函数描述, R^2 达0.986以上,表明拟合方程在隧底荷载0.5~2.5 MPa范围内具有较高可信度。其中,隧道中线的斜率略大于道床板中线,表明其对隧底荷载更敏感,这可能与隧道中线处受力集中、荷载传递路径较短有关。

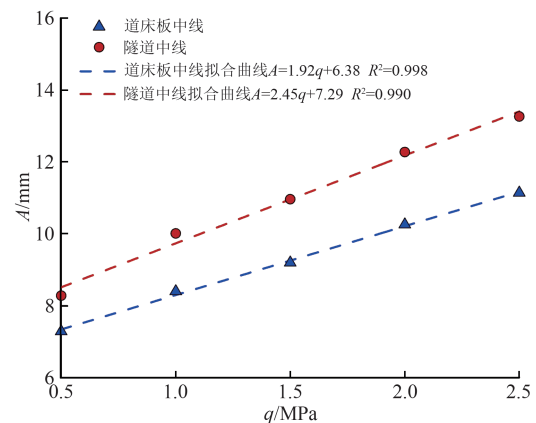


图17 幅值随荷载变化曲线

4.2 仰拱欠厚的影响

图 18 为隧道中线和道床板中线上拱变形幅值随仰拱厚度 (h) 变化曲线。上拱幅值随仰拱厚度增加显著减小, 表明增加仰拱厚度能有效抑制隆起变形。拟合结果显示, 幅值变化可用幂函数描述, R^2 均超过 0.947。从拟合式看, 隧道中线的指数较大, 表明仰拱欠厚对其幅值影响更显著; 道床板中线的指数较小, 受影响相对较弱。当仰拱厚度达到设计值 0.6 m 时, 两者幅值接近, 表明设计厚度能在一定程度上协调无砟轨道与隧底结构的变形分布。在仰拱欠厚条件下, 隧道中线幅值始终明显高于道床板中线, 且差距随厚度减小而扩大, 反映欠厚加剧变形不均, 这可能与隧道中线受力集中有关。

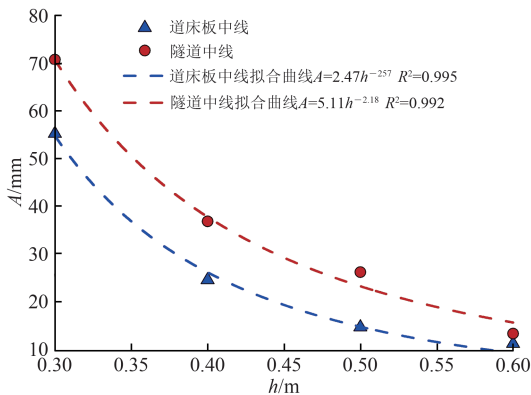
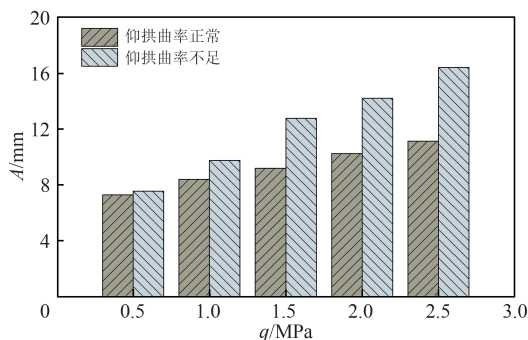


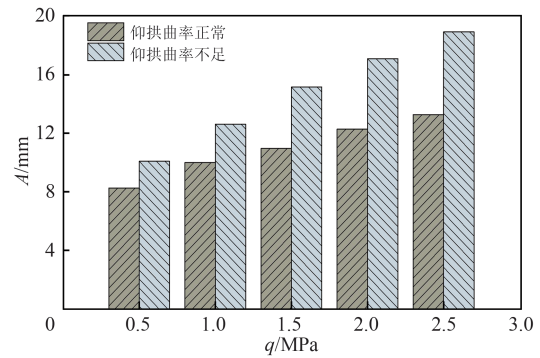
图 18 幅值随仰拱厚度变化曲线

4.3 仰拱曲率的影响

图 19 比较了正常物理模型与仰拱曲率不足模型在不同隧底荷载下的隆起变形幅值。总体来看, 仰拱曲率不足在不同隧底荷载条件下显著增大了隆起变形幅值。其中, 道床板中线的平均增大百分比约为 17.29%, 隧道中线的平均增大百分比约为 25.26%。这一现象表明, 仰拱曲率的减小使得仰拱的承载能力明显降低, 加剧了隧底结构隆起变形向轨道传递。



(a) 道床板中线



(b) 隧道中线

图 19 仰拱曲率对幅值的影响

5 结 论

基于相似准则, 建立无砟轨道-隧底结构相似模型, 并采用 3D 打印制作物理模型。通过设计的试验工装, 模拟高地下水压力和围岩膨胀力导致的无砟轨道上拱变形。通过分析试验数据, 得到主要结论如下。

(1) 在隧底荷载作用下, 中心水沟、填充层及道床板表面均受拉, 其中, 中心水沟表面受拉程度最大; 横向应力显著大于纵向应力, 结构更易沿纵向开裂。裂纹分布特征与应力分析结果及现场调研结果相吻合, 主要分布于两侧边界及中心水沟表面, 且主要沿线路纵向分布。

(2) 施工缝处的变形挤出效应是道床板中线与隧道中线变形的显著特征, 这使得加载范围的上拱变形曲线表现为板中央下沉、板端上翘。隧道中线上拱变形整体值高于道床板中线, 表明自下而上的变形传递过程中发生衰减。这主要是由于隧道中线存在中心水沟这一薄弱环节, 使得隧底上拱更加显著。随着隧底荷载的增加, 上拱幅值基本呈线性函数增加, 且隧道和道床板中线的上拱幅值差异加剧。

(3) 仰拱厚度与曲率对隧底结构隆起变形的产生及传递影响显著。仰拱欠厚使得上拱幅值按幂函数形式显著增加, 并使隧道中线与道床板中线的变形幅值差异增大, 加剧结构变形的不均匀性; 仰拱曲率的减小显著降低了仰拱的承载性能, 导致隧底结构隆起变形更易向上传递, 进而加剧轨道不平顺, 降低了无砟轨道与隧底结构体系的整体稳定性与耐久性。试验结果可为采用通用设计图且混凝土材料性能满足现行工程规范规定取值的无砟轨道-隧底结构体系提供参考。

参 考 文 献

- [1] 巩江峰,王伟,王芳,等.截至2023年底中国铁路隧道情况统计及2023年新开通重点项目隧道情况介绍[J].隧道建设:中英文,2024,44(2):377-392.
(GONG Jiangfeng, WANG Wei, WANG Fang, et al. Statistics of China's Railway Tunnels by the End of 2023 and Overview of Tunnels of Key New Projects in 2023 [J]. Tunnel Construction, 2024, 44 (2): 377-392. in Chinese)
- [2] 宋慧来,林锦镇,蒋典佑,等.隧道内无砟轨道上拱变形特征及行车安全性研究[J].中国安全科学学报,2024,34(1):187-192.
(SONG Huilai, LIN Jinzhen, JIANG Dianyou, et al. Research on Deformation Characteristics and Driving Safety of Upper Arch of Ballastless Track in Tunnel [J]. China Safety Science Journal, 2024, 34 (1): 187-192. in Chinese)
- [3] LIU Y, SONG H L, SUN X D, et al. Characteristics of Rail Deformation Caused by Tunnel Floor Heave and Corresponding Running Risk of High-Speed Train [J]. Construction and Building Materials, 2022, 346: 128385.
- [4] 周保安,吴剑,王立川,等.基于行车安全的ZJY高铁隧道底隆致无砟轨道变形处置实践与探讨[J].隧道建设:中英文,2021,41(3):474-482.
(ZHOU Bao'an, WU Jian, WANG Lichuan, et al. Practice and Discussion on Treatment of Ballastless Track Deformation of a High-Speed Railway Tunnel Caused by Floor Heave Based on Traffic Safety [J]. Tunnel Construction, 2021, 41 (3): 474-482. in Chinese)
- [5] FANG X H, YANG J S, XIANG M L, et al. Model Test and Numerical Simulation on The Invert Heave Behaviour of High-Speed Railway Tunnels with Rainstorm [J]. Transportation Geotechnics, 2022, 37: 100891.
- [6] CHEN Y F, CUI Y J, BARRETT A, et al. Investigation of Calcite Precipitation in The Drainage System of Railway Tunnels [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, 84: 45-55.
- [7] JUNG H S, HAN Y S, CHUNG S R, et al. Evaluation of Advanced Drainage Treatment for Old Tunnel Drainage System in Korea [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2013, 38: 476-486.
- [8] 李正士.化学侵蚀条件下隧道衬砌混凝土和排水病害的防治措施[J].铁道建筑技术,2012(7):90-93.
(LI Zhengshi. Chemical Erosion under the Conditions of Tunnel Lining Concrete and Drainage Measures of Defects Prevention and Treatment [J]. Railway Construction Technology, 2012 (7): 90-93. in Chinese)
- [9] JIA N, TASSIN B, CALON N, et al. Scaling in Railway Infrastructural Drainage Devices: Site Study [J]. Innovative Infrastructure Solutions, 2016, 1 (1): 42.
- [10] 陈鸿,汪大新.膨胀土隧道仰拱施工技术[J].隧道建设,2010,30(5):582-585.
(CHEN Hong, WANG Daxin. Construction Technology for Tunnel Invert in Swelling Soil [J]. Tunnel Construction, 2010, 30 (5): 582-585. in Chinese)
- [11] 赵涛,梁庆国,吴飞亚,等.基底围岩膨胀对泥岩隧道受力特性的影响[J].东南大学学报(自然科学版),2022,52(3):538-546.
(ZHAO Tao, LIANG Qingguo, WU Feiya, et al. Impact of Base Surrounding Rock Expansion on The Mechanical Characteristics of Mudstone Tunnel [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2022, 52 (3): 538-546. in Chinese)
- [12] 徐志平.膨胀性泥岩铁路隧道变形机理与仰拱底鼓控制技术研究[J].铁道标准设计,2024,68(5):113-121.
(XU Zhiping. Study on the Deformation Mechanism and Control Technology of Arch Bottom Bulging of Railway Tunnel in Expansive Mud Stone [J]. Railway Standard Design, 2024, 68 (5): 113-121. in Chinese)
- [13] 杜明庆,董飞,李奥,等.膨胀性围岩时高速铁路隧道仰拱的底鼓机理及破坏模式[J].中国铁道科学,2019,40(6):78-85.
(DU Mingqing, DONG Fei, LI Ao, et al. Mechanism and Failure Mode of Floor Heave in Tunnel Invert of High-Speed Railway under Expansive Surrounding Rock [J]. China Railway Science, 2019, 40 (6): 78-85. in Chinese)
- [14] 崔蓬勃,朱永全,高焱,等.铁路膨胀岩隧道初期支护稳定性分析及设计优化[J].铁道建筑,2017,57(5):62-66.
(CUI Pengbo, ZHU Yongquan, GAO Yan, et al. Stability Analysis and Design Optimization for Preliminary Support of Railway Swelling Rock Tunnel [J]. Railway Engineering, 2017, 57 (5): 62-66. in Chinese)
- [15] 杨为民,王浩,杨昕,等.高地应力-高水压下隧道突水模型试验系统的研制及应用[J].岩石力学与工程学报,2017,36(增2):3992-4001.

- (YANG Weimin, WANG Hao, YANG Xin, et al. Development and Application of Tunnel Water Inrush Model Test System under High Geostress and High Water Pressure [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36 (Supplement 2): 3992-4001. in Chinese)
- [16] 杜明庆,张顶立,张素磊,等.高速铁路隧道仰拱结构受力现场实测分析[J].中国铁道科学,2017,38(5):53-61.
(DU Mingqing, ZHANG Dingli, ZHANG Sulei, et al. Field Test and Analysis of Mechanical Characteristics of Tunnel Invert Structure for High-Speed Railway [J]. China Railway Science, 2017, 38 (5): 53-61. in Chinese)
- [17] HE B G, ZHANG Y, ZHANG Z Q, et al. Model Test on the Behavior of Tunnel Linings under Earth Pressure Conditions and External Water Pressure [J]. Transportation Geotechnics, 2021, 26: 100457.
- [18] 张彩亮,刘秀波,柯在田,等.地下水作用致隧道底鼓和双块式无砟轨道变形规律研究[J].铁道建筑,2024,64(6):1-8.
(ZHANG Cailiang, LIU Xiubo, KE Zaitian, et al. Research on Deformation Laws of Tunnel Heaving Floor and Ballastless Track with Double-Block Sleeper Caused by Groundwater [J]. Railway Engineering, 2024, 64 (6): 1-8. in Chinese)
- [19] 何明磊,胡磊,孟祥磊.隧道衬砌水压力荷载及内力研究[J].铁道标准设计,2014,58(2):79-83.
(HE Minglei, HU Lei, MENG Xianglei. Research on Water Pressure Load and Internal Force of Tunnel Lining [J]. Railway Standard Design, 2014, 58 (2): 79-83. in Chinese)
- [20] 赵国堂,李晨曦,宋慧来,等.铁路隧道内无砟轨道上拱变形模型及其应用研究[J].铁道学报,2025,47(1):101-111.
(ZHAO Guotang, LI Chenxi, SONG Huilai, et al. Study on Analysis Model and Its Application of Upward Deformation of Ballastless Track in Railway Tunnel [J]. Journal of the China Railway Society, 2025, 47 (1): 101-111. in Chinese)
- [21] 江权,宋磊博.3D打印技术在岩体物理模型力学试验研究中的应用研究与展望[J].岩石力学与工程学报,2018,37(1):23-37.
(JIANG Quan, SONG Leibo. Application and Prospect of 3D Printing Technology to Physical Modeling in Rock Mechanics [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37 (1): 23-37. in Chinese)
- [22] 叶飞,杨鹏博,毛家骅,等.基于模型试验的盾构隧道纵向刚度分析[J].岩土工程学报,2015,37(1):83-90.
(YE Fei, YANG Pengbo, MAO Jiahua, et al. Longitudinal Rigidity of Shield Tunnels Based on Model Tests [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37 (1): 83-90. in Chinese)
- [23] 禹海涛,张敬华,季倩倩,等.基于3D打印技术的盾构隧道模型设计与制作[J].铁道科学与工程学报,2017,14(8):1707-1714.
(YU Haitao, ZHANG Jinghua, JI Qianqian, et al. Design and Fabrication of Shield Tunnel Models Based on 3D-Print Technology [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2017, 14 (8): 1707-1714. in Chinese)

Experimental Study on Uplift Deformation Patterns of Ballastless Track in Railway Tunnels

ZHAO Yixin¹, SONG Huilai², SHAO Yajian³, ZHAO Lei⁴

(1. Railway Infrastructure Inspection Center, China Academy of Railway Sciences Corporation Limited, Beijing 100081, China;

2. State Key Laboratory of Performance Monitoring and Protecting of Rail Transit Infrastructure, East China Jiaotong University, Nanchang Jiangxi 330013, China;

3. School of Civil and Transportation Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China;

4. Railway Engineering Research Institute, China Academy of Railway Sciences Corporation Limited, Beijing 100081, China)

Abstract: Uplift deformation of railway tunnel invert structures can occur under high groundwater pressure and surrounding rock swelling, inducing track irregularities and affecting the safe and smooth operation of high-speed trains. To investigate the uplift deformation patterns of ballastless track in railway tunnels, a ballastless track-tunnel invert similarity model was established based on similarity principles. The physical model was fabricated using 3D printing, and a customized loading apparatus was used to simulate and control the invert load. Results

show that, under the invert load, the surfaces of all structural layers are in tension, with the central drainage channel surface exhibiting the most pronounced tension. The transverse stress is significantly greater than the longitudinal stress, making the structure more prone to longitudinal cracking, which is consistent with the field crack distribution patterns. Regarding deformation, a pronounced extrusion effect occurs at construction joints, and the central drainage channel, and as a weak part, causes the deformation at tunnel centerline to be consistently larger than that at the track bed slab centerline. With increasing invert load, the deformation amplitude increases approximately linearly, and the difference between the two widens. Moreover, insufficient invert thickness and reduced curvature significantly aggravate the occurrence and propagation of uplift deformation; a decrease in invert thickness leads to a power-law increase in uplift amplitude. The findings provide a reference for controlling tunnel invert uplift defects and optimizing structural design.

Key words: High-speed railway; Ballastless track; Tunnel invert uplift; 3D printing; Model test

(责任编辑 王蕴嘉)