

寒冷地区高速铁路路基冻胀变形监测研究

熊亚辉

(中铁十八局集团第一工程有限公司, 河北 涿州 072750)

摘要: 为提升寒冷地区高铁工程质量, 结合包头至银川高铁临河至省界段 BYZQ-07 标段的实际工程案例, 针对高速铁路工程路基冻胀变形监测展开深入研究, 系统阐述了路基冻胀变形监测的基准点与冻胀观测点的布设、观测周期及频次、测量方法及监测数据分析等关键点。通过对该标段冻胀变形的长期监测, 揭示了冻胀变形规律及其对高速铁路路基稳定性的影响, 为寒冷地区高速铁路路基设计、施工及运营维护提供了科学依据和技术支持。研究表明, 通过严控铁路路基冻胀变形监测要点与数据分析能够有效预测和控制路基冻胀变形, 及时采取有效措施, 保障高速铁路的安全运营, 可供同类工程参考借鉴。

关键词: 高速铁路; 路基; 冻胀变形; 监测; 测点布设

中图分类号: U213.14

文献标识码: A

Study on Frost Heave Deformation Monitoring of High-Speed Railway Subgrades in Cold Regions

XIONG Yahui

(China Railway 18th Bureau Group First Engineering Co., Ltd., Zhuozhou 072750, Hebei, China)

Abstract: In order to improve the quality of high-speed railway projects in cold regions, combined with the actual engineering case of the BYZQ-07 section of the Linhe to Provincial border section of the Baotou to Yinchuan high-speed railway, an in-depth study is carried out on the monitoring of frost heave deformation of the subgrade of high-speed railway projects. This paper systematically expounds the key points such as the reference points for monitoring the frost heave deformation of the roadbed, the layout of frost heave observation points, the observation period and frequency, the measurement methods, and the analysis of monitoring data. Through long-term monitoring of the frost heave deformation of this section, the law of frost heave deformation and its influence on the stability of high-speed railway subgrades have been revealed, providing scientific basis and technical support for the design, construction and operation and maintenance of high-speed railway subgrades in cold regions. The research shows that by strictly controlling the key points and data analysis of railway subgrade frost heave deformation monitoring, it is possible to effectively predict and control the subgrade frost heave deformation, and take effective measures in a timely manner to ensure the safe operation of high-speed railways, which can be used as a reference for similar projects.

Key words: high-speed railway; subgrade; frost heave deformation; monitoring; monitoring point layout

路基冻胀变形是寒冷地区高铁修建和运营面临的关键难题之一, 冻胀变形不仅会降低线路的乘坐舒适性, 给行车带来安全隐患, 严重时还会造成线路的破坏^[1]。因此, 准确监测高速铁路路基冻胀变形是保障高铁安全运行的重要环节, 本项目

针对包头至银川高铁临河至省界段 BYZQ-07 标段展开相关研究, 项目所在地区冬季寒冷、冻土厚度大, 具有典型代表性。结合工程的实际情况, 对高速铁路工程路基冻胀变形进行了严密监测, 取得了比较理想的监测效果。

收稿日期: 2025-11-24

作者简介: 熊亚辉, 工程师, 本科, 研究方向为工程测量

1 工程概况

包头至银川高铁临河至省界段 BYZQ-07 标段位于内蒙古自治区,是我国北方寒区高铁网的重要组成部分,起点 DK281+650,终点 DK338+800,正线全长 57.035 km,包括区间路基、多座桥梁和箱梁制作等多个重点工程,其中区间路基长 42.36 km,工程所在地区冬季寒冷,路基冻胀性变形是制约这一区域铁路安全运行的主要原因。

(1) 水文及工程地质:案例工程沿线位于中温带亚干旱与半干旱气候区,气候干旱缺雨,降水多集中在七、八月,夏季炎热,冬季严寒,昼夜温差大,四季变化明显,无霜期短。冻结期为每年 10 月底至翌年 4 月末。沿线土壤最大冻结深度为 108~154 cm。霜冻、冰雹、大风等为地区主要灾害性天气。结合气候对铁路工程的影响程度,本区域气候分区为寒冷地区。本区段沿线地表水主要为黄河及其支流,沿线地下水主要为第四系孔隙潜水,局部有少量基岩裂隙水、岩溶水。线路绝大部分穿行于河套盆地、银川盆地内,以第四系各类松散堆积层为主,岩土类型包括粉土、黏性土、粉砂、细砂、粗砾砂、粗细圆砾土以及石灰岩和砂泥岩。不良地质作用主要包括地震液化及风沙;特殊土包括软土和盐渍土。

(2) 工程重难点:案例工程沿途的地形和地质情况比较复杂,地形起伏较大,部分地区有风沙区,土地荒漠化程度较高,地下水埋深较大,土壤盐碱化程度较高,对路基稳定性提出了严峻挑战^[2]。冬季气温低且冻土厚度大,对高铁路基稳定有较大影响。为了保证铁路的安全运行,对路基的冻胀变形进行精确的监测具有重要意义^[3],但冻胀形变监测存在精度要求高及观测周期长等技术挑战,因此如何保证监测结果的准确性与可靠性是该项目的另一个难点。

2 路基冻胀变形机理与冻胀变形监测所要解决的问题

路基冻胀变形实际上是在温度场的作用下使土体结构内部产生非平衡态热力学过程,其主要机理以土力学和热力学耦合为基础,即在温度梯度引起的热力学持续作用下,未冻结区水分沿动态水土势梯度向冻结锋面迁移,并伴随水-冰相变;相变释放出的潜热会反过来影响土体温度场,由于分凝冰逐渐生长,使土骨架中产生一定

的冻胀应力,这一应力的作用会打破上部荷载以及土体约束之间保持的力学平衡,最终引起路基抬升变形^[4]。

通过冻胀变形监测,可验证并修正冻胀理论,如通过对温度场、水分场以及变形场开展同步监测,直观掌握从水分迁移开始到最终引起变形的整个过程,以此实现对冻胀理论的验证。此外,根据监测结果还能解决以下几个问题:①确定路基的冻胀变形峰值和最大冻结深度是否保持同步,以及水分迁移峰值产生于冻结时期的具体阶段环节。②通过对路基不同深度层次开展的变形监测,对包含基床表层与底层等在内的各土层的冻胀量占比进行量化,进而找出病害所在具体层位。③通过长时间动态监测,确定各项边界条件对冻胀作用的影响,进而明确现场环境条件和冻胀发生之间的关系。

3 高速铁路路基冻胀变形监测

包银高铁与路基冻胀相关的地质风险主要有季节性冻土引发的各类冻害。线路沿线 11 月至次年 3 月气温处于零度以下,属严寒地区,表层土普遍具有冻胀性,冻结深度为 0.79~1.54 m。因此,基底处理时需做好路基填料的选择、防冻胀、压实等措施;路堑顶设天沟,路堑两侧设渗水盲沟,以排除地表水及地下水,做好防冻胀措施。沿线地处严寒地区,冬季易遭受冻害,春季融雪积水,易出现反复冻融现象,需做好截水、排水和其他防冻胀措施,以免产生表层季节性冻害。根据《铁路工程沉降变形观测与评估技术规程》(Q/CR 9230—2025),需对严寒地区路基地段进行冻胀变形监测,通过全面、准确、系统地冻胀变形监测,详细掌握路基冻胀的具体变化情况,以便及时采取防冻胀加强措施及进行铁路运营维护。

3.1 监测方法

3.1.1 基准点、工作基点及冻胀观测点的埋设

为保证基准点的稳定和精度,依照《高速铁路工程测量规范》(TB10601—2009)中的三级竖向位移测量规范^[5],确保邻近参考网基线高程偏差不大于 1.0 mm,单点高程偏差不大于 0.30 mm,冻胀性水准观测网的观测点的高程偏差小于 1.0 mm,相邻观测点的高差偏差不大于 0.5 mm。在此基础上,本项目采用 DS1 型水准仪及铟瓦水准尺开展观测,全程统一高精度仪器设备,固定的参考点与工作基点。为保证测量精度,本项目

利用卫星定位技术获取参考点的高精度三维坐标，再通过水准测量实现局部区域的精细定位。

路基冻胀水准观测涵盖路堤、路堑地段以及路桥、路涵、路隧等过渡段的冻胀变形监测。冻胀变形监测点分为基准点、工作基点和冻胀观测点，为获得精准量测数据，具体各测点布置如下：

(1) 基准点是整个监测网的基础，在每个独立监测网络中，至少布置3个稳定可靠的参考点，这些参考点之间的距离一般不超过1 km，参考点的位置应充分考虑其稳定性，即应将其建于变形区之外的稳定地带^[6]。基准点采用全线稳固的CPⅠ、CPⅡ、深埋水准点、二等水准点，经复测审批完成后选用精度较高的点位作为全线基准点，控制全线冻胀观测工作。本次冻胀监测外业测量采用的基准点与施工单位沉降观测使用的基准点一致。冻胀水准观测基准点可采用扩大基础或锥形桩等形式以减少冻胀的影响，在冻胀观测前应进行基准点的复测。

(2) 工作基点可采用普通水准点，按国家二等水准测量要求加密水准基点或新设工作基点，以满足工点垂直位移监测需要。工程冻胀监测工作基点与沉降观测使用的工作基点一致。

(3) 冻胀观测点的布置比较精细，要全面考虑不同位置及关键区段^[7]。为了保证观测点的稳定，冻胀观测测桩宜选用设置预制混凝土短桩或钻孔植入钢桩形式的标准变形监测桩。本次监测将冻胀监测点与沉降观测点统筹共用，桩体采用 $\phi 20\text{ mm}$ 钢筋，顶部磨圆且标画十字标识；待基床表层级配碎石施工完成后，精准放样埋设至各观测断面，埋深0.3 m，并沿桩周0.15 m用M10

水泥砂浆浇筑固定。埋设完工后，按二等水准测量要求测量桩顶标高，以此作初始读数；观测桩周边级配碎石应夯实、密贴桩体。当布置的冻胀监测断面与沉降观测断面不能共用时，观测点埋设参见图1。冻胀变形观测断面的观测点设在同一断面上，每个断面布置3个冻胀观测桩，设置于双线路基中心及左右两侧路肩处（图2、图3）。观测点编号严格遵循下列规则：①所有测点编号都应独一无二；②测点编号应包含其位置信息；③采用固定层级与格式，以方便后续处理与管理；④为未来测点增补预留编号冗余空间。需要注意，该监测方案将观测点埋深确定为0.3 m，但沿线范围内土壤最大冻结深度可达108 ~ 154 cm，所以监测结果主要反映的是基床表层产生的冻胀变形，不能直接获取冻结锋面下部水分迁移情况以及深层冻胀情况。后续监测过程中必要时可增加深层测点，即将测点埋深布设至最大冻结深度以下，以此实现路基整体冻胀状况的全面评估。

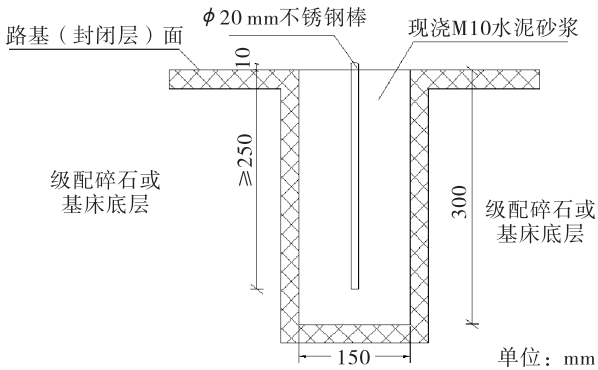


图1 观测点埋设示意图

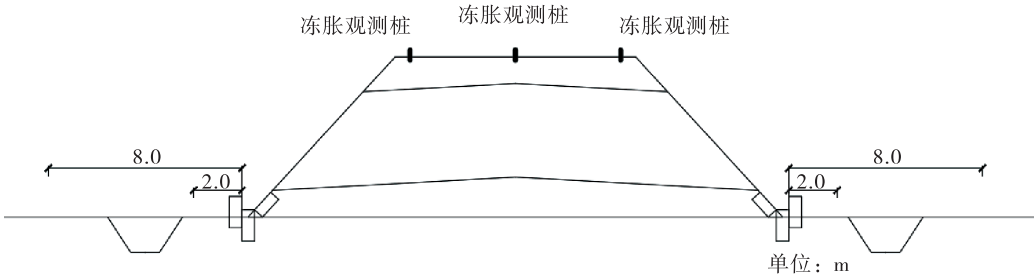


图2 路堤地段观测断面布置图

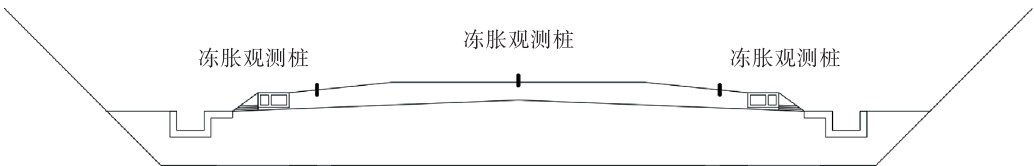


图3 路堑地段观测断面布置图

(4) 路基冻胀水准观测断面布设应依据地质、水文条件,不同冻结深度以及路基结构形式等具体情况确定,并符合下列规定:冻胀观测断面间距不超过 100 m,连续路基冻胀监测点段不少于 3 个,在关键区段应适当加密。在此基础上,工程还对桥梁(框架)过渡段、路桥过渡段、隧道过渡段等特殊区域,分别设计相应的监测断面,路涵(框构)过渡段布设不小

于 3 个断面,其中 1 处于涵洞顶部,路桥(涵)过渡段观测断面布置见图 4,路隧(填挖)过渡段观测断面布置见图 5。本标段共设置观测断面 732 个,全部利用,不再单独设置冻胀观测断面。整套观测点及断面布设方案可在保障实测资料可靠的前提下,进一步提升监测工作的有效性与科学性,实现对路基冻胀变形的精确监测。

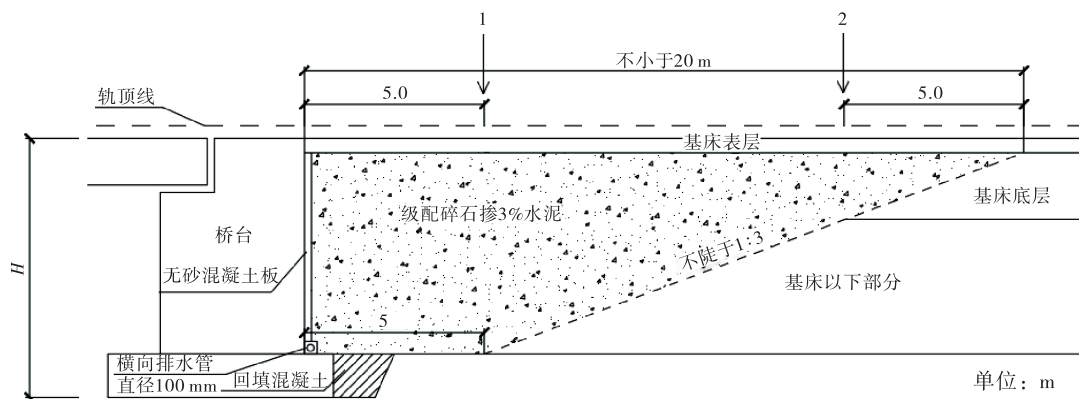


图4 冻胀监测段路桥(涵)过渡段观测断面布置

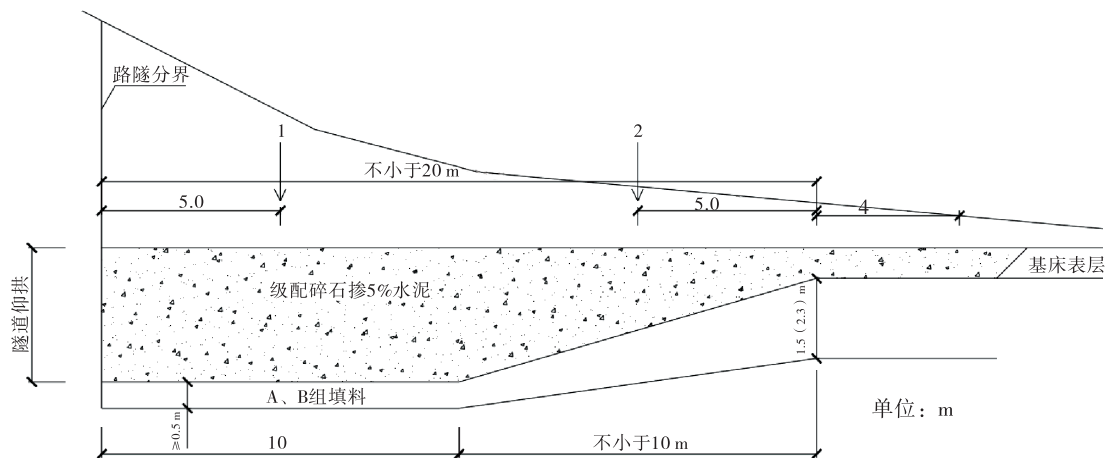


图5 冻胀监测段路隧(填挖)过渡段观测断面布置

3.1.2 观测周期及频次

为了精确地把握路基冻胀变形的情况,必须选择合适的观测时段和频率,本项目根据《高原铁路季节冻土地区路基冻胀监测检测技术条件》(Q/CR629—2018)中的有关要求,结合实际施工情况及气象情况,确定监测时间为 2024 年 11 月至 2025 年 5 月。在完整冻融周期内观察 4 次以上:根据当地气象条件,在临近冻结前观测 1 次,当地最冷月观测 1 次,开始融化前观测 1 次,完全融化后观测 1 次。当单次变化量或累计变化量异常时,适当加密监测

频次。本项目冻胀监测常规监测频次为每月 1 次。该监测频次的设置可以有效地把握土体的冻胀变形临界期,根据监测结果及时地采取相应的应对措施。

3.1.3 测量方法

外业观测采用天宝 Dini03 电子水准仪(标称精度 0.3 mm/km),配以 3 m 钢瓦条码水准尺及 5 kg 尺垫。仪器与标尺使用前均已检定合格。路基冻胀变形监测按二等水准测量精度要求形成附和水准路线,冻胀变形监测水准路线观测示意图如图 6 所示。

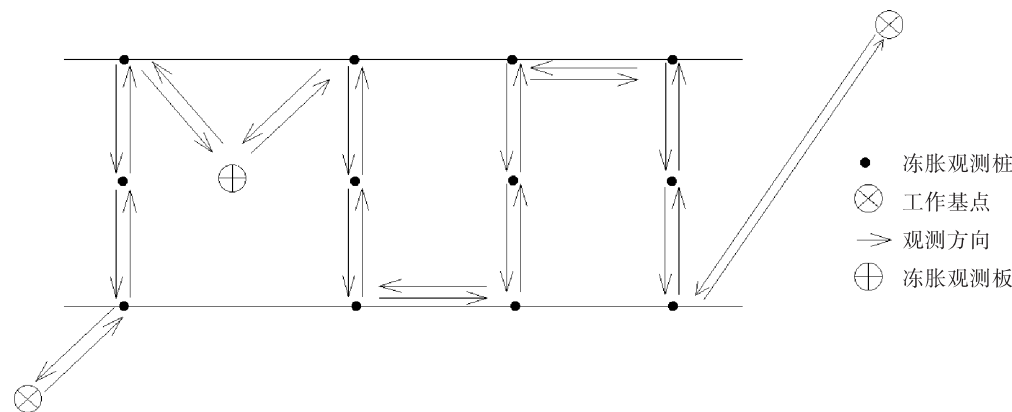


图6 路基冻胀变形监测水准路线观测示意图

观测采用单路线往返测模式，同一测段使用固定仪器和标尺，且测段站数须为偶数^[8]。主要限差控制如下：视线长度3~50 m，前后视距差≤1.5 m，累积差≤6.0 m，视线高度≥0.55 m；测站两次读数高差之差≤0.6 mm，检测间歇点高差之差≤1.0 mm。观测顺序按奇偶站分别执行“后—前—前—后”和“前—后—后—前”，往返测于不同时段进行，返测前互换前后尺。晴天须为仪器遮阳，夜间须对仪器保温，扶尺时借助尺撑确保标尺垂直和气泡居中。观测数据采用电子

手簿自动记录，数据处理采用严密平差，当相邻周期沉降量超限或出现反弹时，须复核工作基点并重测。采用往返测观测，水准数据取位需符合表1要求，水准测量的精度及限差如表2所示。

表1 水准测量数据取位表

等级	往(返)测距离总	往(返)测距离中	各测站高差	往(返)测高差总	往(返)测高差中	高程/mm
	和/km	数/km	/mm	和/mm	数/mm	
二等	0.01	0.1	0.01	0.01	0.1	0.1

表2 水准测量精度表

水准测量等级	测段、路线往返测高差不符值/mm		附和路线或环线闭合差/mm		检测已测测段高差之差/mm	每千米高差偶然中误差 M_{Δ} /mm	每千米水准测量全中误差 M_W /mm
	平原	山地	平原	山地			
二等	$\pm 4\sqrt{K}$	$\pm 0.8\sqrt{n}$	$\pm 4\sqrt{K}$		$\pm 6\sqrt{R_i}$	≤ 1	≤ 2

注：表2中K为测段水准路线长度， R_i 为检测测段的长度，小于1 km时按1 km计。 n 为测段水准测量测站数，当山区水准测量每公里测站数 $n \geq 25$ 站时，采用测站数计算高差测量限差^[9]。

在监测过程中，本项目利用双频激光干涉技术实现监测点位移的高精度测量，有效消除大气折射及温度变化的影响，精度达到微米量级。并将智能测量机器人引入测量过程，按照预先设定好的测量程序，将测量数据实时传输至监控中心，有效地提高测量效率及数据质量。同时，建立完善的测量数据质量控制系统，在监测过程中通过大数据分析技术实时监测与分析数据，一旦发现异常，立即进行复测与校正。此外，通过在测区设置遮阳棚及防风罩等设施，降低直接日照与风扰等因素的影响。

3.1.4 高路堤线上线下的三角高程联测方法

在高路堤区，由于路基填土高度较高，常规几何水准法难以满足要求，加大了联测的难度。

为解决此难题，本项目提出一种无须量取测量仪高度及棱镜高度的高程转换方法：通过中间设站三角高程测量实现高程换算。这种方法只需准确地测定仪器与棱镜之间的斜距和竖直角，即可计算求得高差，测量原理如图7所示，要求测量时线上、线下棱镜高完全一致且处于竖直状态，棱镜连接件采用精加工的等长棱镜杆，其互换后高差小于0.2 mm。

案例工程采用测角精度不低于1"、测距精度为1 mm+2 ppm的机器人式全站仪，配套稳定坚固的特制木质三脚架与特制的等长棱镜杆（两根棱镜杆互换性高差小于0.2 mm），搭配徕卡GPR121精密棱镜开展观测；温度计读数精确至0.2℃，气压计读数精确至0.5 hPa。实测过程中

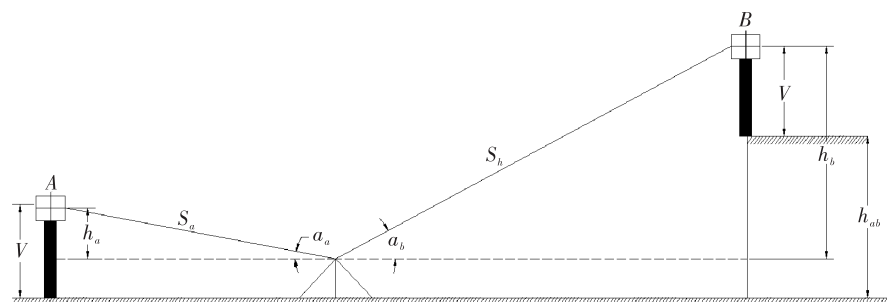


图7 中间设站三角高程测量示意图

对垂直角度及间距等参数进行了严格的控制。具体要求如下：①三角高程观测竖直角时，共观测4个测回，测回间指标差较差 $\leq \pm 5.0''$ ，测回间垂直角较差 $\leq \pm 5.0''$ 。②距离观测时，需精确测定气压值、温度，以便进行边长修正。进行4次测回观测时，应确保前后视距差 $\leq \pm 5.0$ m，测回内较差及测回间较差均 $\leq \pm 2.0$ mm，两组观测高差较差 $\leq \pm 1.0$ mm，否则重测^[10]。③每测站边长观测均需进行温度、气压等气象元素修正，温度计读数精确至 0.5°C ，气压计读数精确至1 hPa。④施测时需进行两组独立的观测，第一组观测完成后，稍挪动测站位置后进行第二组观测。仪器至棱镜的观测距离一般不超过100 m，最大不超过150 m。⑤三角高程测量使用电子手簿记录，数据微机传输整理。在获得监测数据后，采用以下公式计算，得到两组高差的平均值作为线路上线下测点之间的传递高差结果。

三角高差的计算公式如下：

$$\Delta h = s_i \times \sin \alpha_i + (1 - k) \frac{s_i^2 \times \cos^2 \alpha_i}{2R} - \left[s_j \times \sin \alpha_j + (1 - k) \frac{s_j^2 \times \cos^2 \alpha_j}{2R} \right] \quad (1)$$

$$\Delta h = D_i \times \tan \alpha_i + (1 - k) \frac{D_i^2}{2R} - \left[D_j \times \tan \alpha_j + (1 - k) \frac{D_j^2}{2R} \right] \quad (2)$$

式中， Δh 为三角高程测量的高差，m； s 为仪器到棱镜的斜距，m（ s_i 、 s_j 分别为不同观测方向仪器至棱镜的斜距）； D 为仪器到棱镜的平距，m； α 为竖直角， $^\circ$ ； k 为大气垂直折光系数，

$k = 0.14$ ； R 为地球平均曲率半径，km（ $R = 6370$ km）。

3.2 监测结果

2024—2025年度，本段共进行7期冻胀监测。将首期观测的高程作为基准，后续每期的高程成果和本期的差值作为这一时间段内路基发生的变形量，正值为冻胀量，负值为回落量。2025年5月第7期包银铁路DK281+650—DK338+800段完成人工监测断面测量共732个，标段内监测冻胀量大于4 mm段落主要有4段，对观测数据进行复核分析及现场观测点检查、填料取样，结果如下。

(1) 2#路基DK286+761—DK287+088，长度327 m。冻胀变化曲线见图8，此段只有287000Z3和287019Z2两个点位出现累计上拱4.2 mm和4.1 mm（图9及图10），其他点位未发现较大上拱。通过现场调查，此段落右幅红线外侧农田有冬灌，判定为外部环境冻融期间对路基本体有轻微影响。经核实，该段落路基边坡防护为拱形骨架，最终确定增设仰斜排水孔开展病害整治，经整治后路基冻胀数值回落至正常区间。

(2) 18#路基DK330+470—DK330+643，长度173 m。由表3可以看出该段落只有330643Z3测点在11月至次年2月最大上拱4.15 mm，2—4月最大回落2.73 mm，此测点间断面测点数据正常，其他点位数据正常，未发现较大上拱，由此分析此段系铺轨时对测点产生扰动导致数据异常波动，非路基本体出现冻胀。

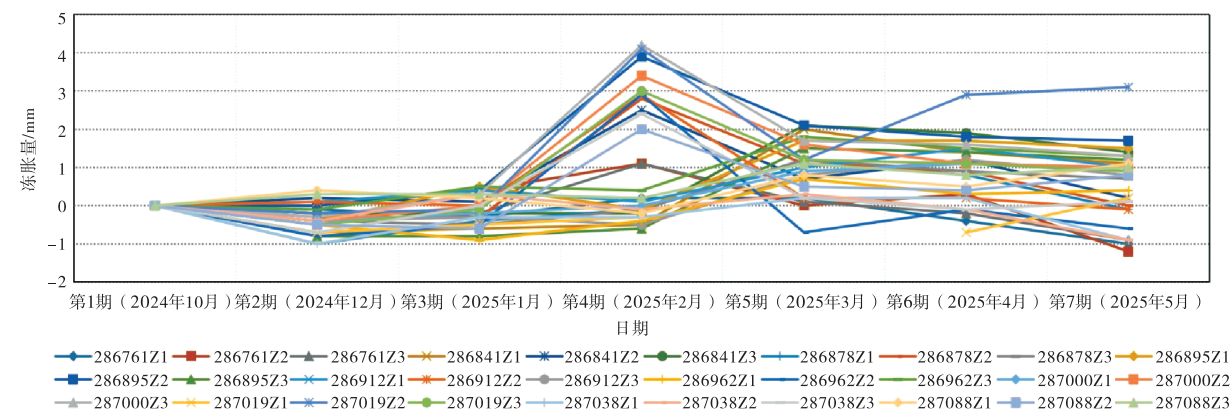


图 8 2#路基 DK286 + 761—DK287 + 088 冻胀变化曲线

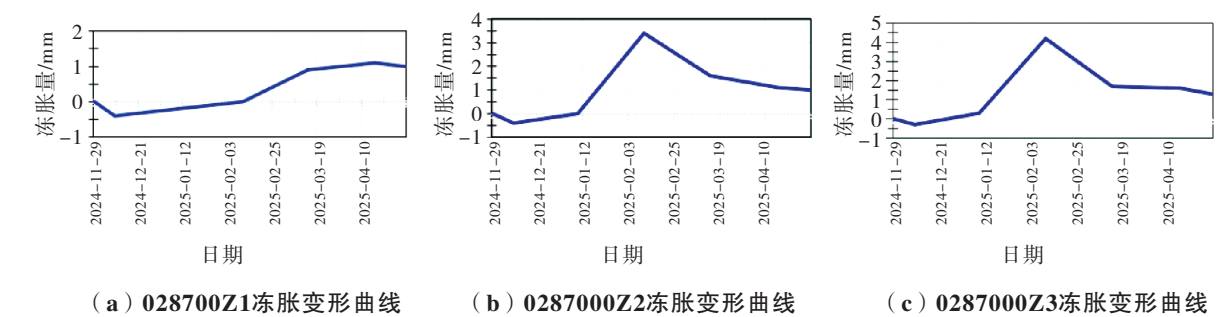


图 9 测点 0287000Z1—0287000Z3 冻胀变形曲线

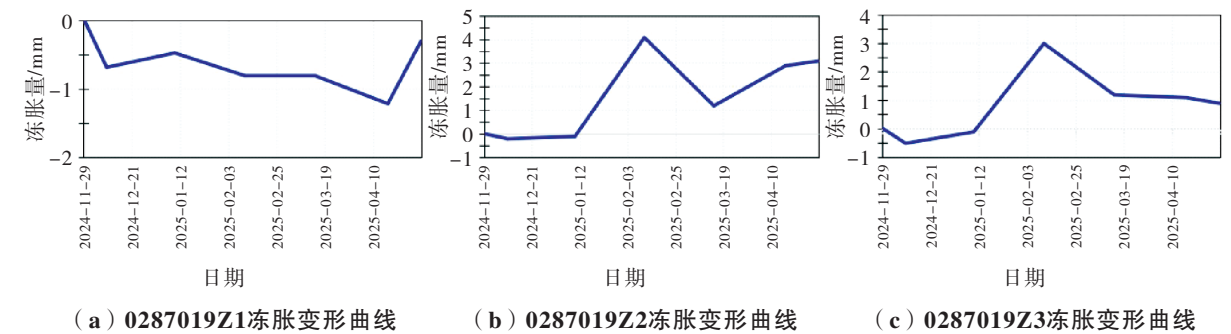


图 10 测点 0287019Z1—0287019Z3 冻胀变形曲线

(3) 18#路基 DK331 + 750—DK331 + 852，长度 102 m。此段落 331750Z3、331844Z1、331844Z3、331852Z2 测点于 11 月 17 日完成冻胀首期数据采集，11 月 21 日沉降数据突变上拱 2.96~4.07 mm，其余时间段变形均正常。结合冻胀数据变形量分析发现，测点是因施工扰动造成数据异常波动，非路基本体出现冻胀。

(4) 18#路基 DK332 + 181—DK332 + 291 段，长度 110 m。此段落 332231Z3、332291Z1、332291Z2、332291Z3 测点 11 月 17 日冻胀首期数据采集完成后，11 月 21 日沉降数据突变上拱 4.07 mm，其余时间段变形均正常。结合冻胀数据变形量，分析原因为首期采集数据精度较差，导致后续各期数据变形值均较大，非路基本体出现冻胀变形。

表 3 18#路基 DK330 + 470—DK330 + 643 冻胀量统计 单位：mm

监测点编号	第 1 期 (2024 年 11 月)	第 2 期 (2024 年 12 月)	第 3 期 (2025 年 1 月)	第 4 期 (2025 年 2 月)	第 5 期 (2025 年 3 月)	第 6 期 (2025 年 4 月)	第 7 期 (2025 年 5 月)
330470Z1	0.00	0.47	0.46	0.31	0.98	1.30	1.11
330470Z2	0.00	1.82	1.97	1.82	1.67	0.14	0.25

续表							
监测点编号	第 1 期 (2024 年 11 月)	第 2 期 (2024 年 12 月)	第 3 期 (2025 年 1 月)	第 4 期 (2025 年 2 月)	第 5 期 (2025 年 3 月)	第 6 期 (2025 年 4 月)	第 7 期 (2025 年 5 月)
330470Z3	0.00	0.50	0.51	0.52	0.05	1.47	1.50
330570Z1	0.00	1.30	1.74	1.58	1.92	1.20	1.13
330570Z2	0.00	2.07	1.69	2.49	2.06	1.25	0.37
330570Z3	0.00	0.00	0.33	0.17	0.08	0.11	0.06
330630Z1	0.00	2.14	2.58	2.55	2.17	1.09	-0.12
330630Z2	0.00	0.37	0.85	0.44	0.74	0.13	0.05
330630Z3	0.00	0.00	0.19	0.00	0.57	-1.24	-2.75
330636Z1	0.00	1.18	1.23	1.58	1.02	-0.34	-1.33
330636Z2	0.00	-0.64	-0.78	-0.67	-0.60	-0.69	-0.38
330636Z3	0.00	1.93	2.30	2.23	2.37	0.97	-0.19
330643Z1	0.00	2.46	0.32	0.08	0.14	-1.43	-1.06
330643Z2	0.00	0.62	0.92	0.77	1.23	-0.23	-1.58
330643Z3	0.00	3.31	3.78	4.15	3.48	1.42	-0.06

基于相邻两期数据较差分析，同一断面测点基本不可能出现较大冻胀差异，结合现场铺轨情况，2025 年 5 月重新布设的点位不计入本次对比，第 7 期冻胀测点 2 113 个的具体数据分析如表 4 所示。

表 4 第 7 期冻胀量数据分析表

总冻胀量 /mm	-7 < 冻胀 量 ≤ 0	0 < 冻胀 量 ≤ 2	2 < 冻胀 量 ≤ 5	5 < 冻胀 量 ≤ ∞
测点数量/个	949	992	172	0
所占比列/%	44.91	46.95	8.14	0

结合现场情况可知，冻胀量最大值 > 2 mm 的区段，受现场施工影响，数据存在误差；同断面冻胀量不大，个别点位突变较大，原因为现场施工导致点位扰动，还需结合后续冻胀数据具体分析。包银 7 标段冻胀量最大值为 4.53 mm，冻胀量超 2 mm 的点位 172 个，占比 8.14%，路基冻胀处于可控范围内，小于一般冻害段落冻胀量 5~25 mm 的规定，包银高铁内蒙古段 7 标段冻胀变形监测断面在 2024—2025 年度监测周期内的冻胀变形不显著。

根据监测数据进行分析：关于冻胀峰值和最大冻结深度之间的同步性，结合气温记录可知，冻胀峰值产生于 1 月中下旬，当地最大冻结深度产生于 2 月上旬，两者有 10~15 天的滞后，可见冻胀峰值比最大冻结深度产生得早，水分迁移峰值产生于冻结锋面不断发展的中后期。关于各层冻胀量的占比，因本方法观测点埋深只有 0.3 m，不能直接对基床表面和底层冻胀贡献进行分层量

化，所以需在后续增设深度各异的新测点，以得出不同分层的冻胀占比。关于边界条件对冻胀造成的影响，根据真实冻胀段相关数据（DK286 + 761—DK287 + 088），外部农田灌溉水源会使冻胀量明显增加，可见水分补给是冻胀产生的关键控制因素之一。

3.3 讨论分析

3.3.1 机理解释

DK286 + 761—DK287 + 088 为真实冻胀段，其监测数据特征符合多场耦合机理，具体包含热力学驱动和水分迁移、相变与力学变形以及空间不均匀性。右侧农田灌溉可以持续不断地提供水分，导致路基土体自然状态下的含水率提高，同时地下水势也因此升高。此时受冬季低温作用，水分逐步向冻结锋面迁移。迁移的水分会在路基部分位置发生冻结，产生持续增大的冻胀应力，并突破上部土体结构的约束作用，主要表现为两个监测点位发生 4 mm 左右的不均匀上拱。待春季气温回升，冰透镜体缓慢消融，融水下渗或向外排出，土体受自身重力作用发生回落。只有部分点位出现较为明显的上拱，可见冻胀变形会因约束条件存在差异或土质分布不均匀等呈现明显差异，最终导致路基出现不均匀变形。

后三段出现的异常数据并不属于本体冻胀，其产生机理和土体以外的因素有关，如传感器和施工活动等。对于 DK330 + 470—DK330 + 643 段，测点 330643Z3 的数据显示 11 月至次年 2 月发生上拱、2—4 月明显回落，表面上处于冻胀循

环过程,但同一断面内的其他测点基本无异常。导致这一现象的原因为该测点所用传感器和土体之间出现不良耦合,比如测杆底部或侧面悬空等,使传感器对温度或其他扰动过于敏感,最终使表观位移监测结果偏大。对于 DK331+750 与 DK332+181 段,其多个测点都在监测后不久(4天)同步产生明显上拱,之后趋于稳定。在时间尺度上,4天无法完成较大均匀冻胀,因为冻结锋面还没有完全深入,虽有水分迁移,但迁移水量也十分有限。引发该监测异常的原因包括:其一,外部力学扰动影响。车辆碾压以及重型机械作业会使监测桩和周围土体出现显著的瞬时相对位移,导致真实变形过程被掩盖。其二,首期数据采集精度偏低。这会使后续差值计算等过程都建立在不准确的基准上,即存在系统误差,这和土体的物理过程没有关系。

3.3.2 时空规律挖掘

在多达 732 个监测断面中,只有 4 段存在异常,且其中只有 1 段属于真实冻胀,由此可见,严重冻胀现象的发生并不普遍,发生真实冻胀现象的区段,其异常点在空间方面具有紧密相邻的特点,而且所处水文地质单元相同,即均与灌溉农田侧毗邻。根据监测时序数据,可将路基变形划分成三类模式:①真实冻胀段,其变形因气温的降低而逐步累积,冻融期后开始回落,变化曲线相对平滑;②阶跃扰动,即在某个监测周期范围内同步出现瞬时阶跃,但后期数据以新基准为基础发生小幅变化,并没有随着季节的变化而回落;③单点异常,即单个测点出现与冻胀相似的上拱与回落现象,但处在同一断面的其他测点基本没有变化。

3.3.3 相关性分析

DK286+761—DK287+088 段监测异常点位的冻胀量,与测点至路基右幅红线周边农田的距离呈负相关,即随着与农田距离的缩短,冻胀量增加,这可以在定量上验证“外部水源持续补给是造成冻胀变形的主要原因”这一结论。DK331+750—DK331+852 与 DK332+181—DK332+291 段产生的阶跃突变具有时间同步的特征,对此需结合施工记录开展交叉验证。如果施工记录表明阶跃产生时存在重型干扰活动,则说明二者存在必然关系。

根据真实冻胀段数据,其变形增量的计算结

果和负温累积值之间为正相关,此外由于热传导以及水分的迁移都需要一段时间,因此这种正相关关系可能存在一定程度的滞后性。对于真实冻胀段,同一断面内的不同测点对应的变形量存在一定的正相关性,其原因为这些测点均受到环境因素的影响。然而,对于单点异常测点,其与同一断面内其他测点在变形序列上的相关性基本不存在,可验证该测点属于孤立异常点。

3.3.4 冻胀规律分析

新建包头至银川高铁内蒙古段冻胀量与温度变化呈现负相关趋势,冻胀演化过程主要分为 4 个阶段:

(1) 第一阶段:冻胀初始波动(11月初至11月底,持续约 30 d)。划分依据:日平均气温在 0℃ 上下交替波动(如 -2~3℃),路基表层土体产生昼融夜冻的现象;冻胀日变化率绝对值 < 0.01 mm/d,累计冻胀量 < 0.1 mm。随着气温间断性交替出现正负温,路基表层出现反复冻融,冻胀变形也随之波动,范围在 0.1 mm 之内。

(2) 第二阶段:冻胀快速发展(12月初起,持续约 30 d)。划分依据:日平均气温持续低于 -5℃,且连续负温天数 ≥ 7 d;冻结锋面下移速率 > 2 cm/d;冻胀日变化率 > 0.03 mm/d,累计冻胀量超过 0.5 mm 并呈近似线性增长。12月初,随着气温迅速降低且在 0℃ 以下持续时间增长,冻胀变形及冻深呈线性快速增长。该阶段冻胀量超过 0.5 mm。

(3) 第三阶段:冻胀稳定维持(1月初—2月底,持续约 2 个月)。划分依据:日平均气温稳定低于 -10℃ (或持续低于 0℃ 且无明显回升),冻深达到年度最大值(本标段最大冻深 2 m)并维持基本不变;冻胀日变化率 < 0.01 mm/d,冻胀量波动范围 ≤ ±0.1 mm。该阶段气温基本保持负温状态,冻胀量和冻深值都基本保持稳定,最大冻深位于 DK230+280.00 处,冻深达 2 m,未超过路基基床深度。此后气温开始波动回升,但基本上还是处于 0℃ 以下,而冻深开始减小。

(4) 第四阶段:波动融化(3月初至4月初,持续 30 d 左右)。划分依据:日平均气温回升至 0℃ 上下波动(如 -2℃ ~ +5℃),冻结锋面开始上移、冻深逐渐减小;冻胀量日变化率为负值(回落),且随气温波动出现反复微幅升降;最终累计残余变形 < 0.2 mm。随着大气温度的逐步

回升至 0°C 上下波动,路基冻胀部分开始融化,路基冻胀量迅速减小并伴随小幅波动。此后,大气温度持续升高,路基全部融透,冻胀消除,但未完全恢复到冻前状态,尚存在较小的残余变形,范围在 0.2 mm 以内。

根据监测结果,BYZQ-07标段包头—银川临河至省界段路基冻胀变形呈现季节变化的特点,不同月份的冻胀变形差异较大,通过严密的几何监测及高路堤线上线下角高程联测方法,可以有效地把握路基的冻胀变形过程及其变形规律,为科学评价路基的稳定性及处理方案的制定奠定基础。虽然经本次监测发现路基对冻胀量有了较好的适应性,但要保证高铁长期安全运行,还需要继续对其进行实时监测,并在发现异常时及时采取相应的处理措施。

4 结语

通过对包头—银川临河至省界段BYZQ-07标段高铁路基冻胀变形监测研究,可以发现:

(1) 为了保障监测结果的可信度,首先必须根据实际情况设计科学合理的路基冻胀变形监测方案,本工程采用的三级竖向位移测定可以满足高铁路基冻胀量监测的需要;其次,要综合考虑地形地貌及工程进度,科学地布置参考点、观测点及监测断面,在冻胀监测时,因观测周期及路基较长,水准线路较短,所以基点数量较多,需注重基点的保护,观测前先复测,确保基点无误后,再进行观测;另外,可灵活设置监测时段和频率,以把握土体的变形动态变化,及时制定更加合理的应对措施,如在铺轨段测量时尽量选在机车静止时,以免出现不必要的误差;最后利用专业的系统软件进行科学严谨的数据处理,可精确揭示路基冻胀量变化规律,为路基稳定评价和养护管理提供科学依据。

(2) 真实冻胀现象和干扰信号的数据在可量化以及本质上存在显著区别,如真实冻胀的时空表现主要为空间上存在局部关联性,而时间上则存在连续缓慢变化以及热力学滞后性,但包含采集误差与施工扰动在内的干扰信号在空间上具有随机性,在时间上则具有瞬时阶跃等特点。由此

可见,不可单纯按照变形量大于预定阈值的要求判定是否为病害,正确方法为通过时空演化分析以及判别多个参数的一致性实现机理验证。

(3) 根据本次冻胀监测分析成果,在类似寒冷地区基础设施监测工作中可采取的科学方法为:首先进行数据检验,以确定其一致性和完整性,找出并剔除采集失误等原因造成的偏差;然后通过时空关联分析确定由于施工扰动等原因产生的阶跃与漂移;最后针对经过以上筛选得出的真实异常数据,通过多参数耦合分析,明确其是否与现有物理机理相符。上述方法可以作为多种基础设施实时监测工作的基本流程,可防止在非异常数据上浪费时间和资源。

案例工程通过上述监测方法取得了理想的监测结果,不仅为本高铁工程建设及运维管理提供可靠的监测数据,还可为我国寒冷地区高铁路基冻胀变形监测及相关技术的发展提供参考与实证支撑。

参考文献:

- [1] 马涛,张永刚,黄世光. 季冻区高铁路基冻融变形特征与影响因素分析[J]. 土工基础,2025,39(2):333-337.
- [2] 张玉芝,杨威,李锐,等. 季冻区重载铁路路基冻胀融沉监测及规律分析[J]. 中国铁道科学,2022,43(5):1-10.
- [3] 魏冠军,梁斌,戴嵩,等. 一种优化组合模型及其在高铁路基冻胀变形预测的应用[J]. 科学技术与工程,2022,22(19):8459-8466.
- [4] 李玉生,段德峰,魏进,等. 季冻区公路路基冻害监测及分析[J]. 路基工程,2022(2):216-222.
- [5] 孙英潮. 严寒地区牡佳高速铁路路基冻胀特性研究[J]. 铁道建筑,2022,62(3):149-152.
- [6] 刘剑刚. 基于北斗GNSS的高原铁路地质灾害监测技术研究[J]. 浙江水利水电学院学报,2024,36(5):48-53,73.
- [7] 马六锋. 高寒地区高速铁路路基冻胀变形监测方法研究[J]. 测绘,2020,43(6):262-264.
- [8] 周森. 成贵铁路路基基床混凝土开裂原因分析及整治[J]. 浙江水利水电学院学报,2020,32(5):65-68.
- [9] 曹太平. 季节性冻土区铁路路基冻胀变形特性研究[J]. 铁道勘察,2019,45(1):59-62.
- [10] 张青波,张正义,曹太平. 建设期与运营期铁路路基冻胀的特征[J]. 铁道建筑,2020,60(11):93-97.