

文章编号: 1674—8247(2024)04—0040—05

DOI: 10. 12098/j. issn. 1674 - 8247. 2024. 04. 008

钢箱系杆拱桥在高速铁路荷载下的节点疲劳分析

李 烨¹ 姜子慕²

(1. 大连市市政设计研究院有限责任公司, 辽宁 大连 116021;

2. 辽宁省市政工程设计研究院有限责任公司, 沈阳 110000)

摘 要:为研究钢箱系杆拱桥应力集中节点在高速铁路荷载下的疲劳性能,本文依托某高速铁路钢箱系杆拱桥工程,采用有限元软件 ANSYS 建立全桥简化模型,并对两处应力极值位置建立精细化局部模型。通过规范评价和疲劳理论评价对精细化局部模型中应力集中节点进行了疲劳分析。研究结果表明本桥各应力节点均满足疲劳性要求,且评价结果远优于限值。

关键词:高速铁路;节点疲劳分析;有限元模拟

中图分类号: U448.22⁺5 文献标志码: A

Fatigue Analysis of Joints in a Steel Box-tied Arch Bridge under High-speed Railway Load

LI Ye¹ JIANG Zimu²

(1. Dalian Municipal Design and Research Institute Co., Ltd., Dalian 116021, China;

2. Liaoning Municipal Engineering Design and Research Institute Co., Ltd., Shenyang 110000, China)

Abstract: To investigate the fatigue performance of stress concentrated joints in a steel box-tied arch bridge under high-speed railway load, this study employed a simplified full-bridge model created using the finite element software ANSYS, based on a specific high-speed railway steel box-tied arch bridge project. Further, detailed local models were established at two locations with maximum stress values for thorough analysis. Both code-based evaluation and theoretical fatigue assessments were conducted on the stress concentrated joints within the refined local models. The results demonstrate that all stressed joints in the bridge meet the required fatigue criteria, with the assessment outcomes significantly exceeding the limiting values.

Key words: high-speed railway; joint fatigue analysis; finite element simulation

我国铁路桥梁建设举世瞩目^[1-2],钢箱系杆拱桥因其良好的整体性而被广泛应用于高速铁路建设中。然而,系杆拱桥内部属于超静定结构,承受外部荷载后部分构件处于严峻的受力环境中,在高速铁路荷载的反复作用下,产生的钢桥疲劳与断裂是导致结构服役性能降低甚至引发灾难性事故的关键因素^[3-4]。因

此,钢箱系杆拱桥在高速铁路荷载下的应力集中节点的疲劳问题不容忽视^[5]。

国内外针对铁路桥梁以及系杆拱桥的疲劳研究相对较多,但针对高速铁路钢箱系杆拱桥疲劳的研究较少。葡萄牙学者 Fernando Marques^[6]基于断裂力学理论,将列车荷载作为随机变量对铁路桥梁复杂铆接

收稿日期:2022-11-08

作者简介:李烨(1995-),男,工程师。

引文格式:李烨,姜子慕. 钢箱系杆拱桥在高速铁路荷载下的节点疲劳分析[J]. 高速铁路技术, 2024, 15(4):40-44.

LI Ye, JIANG Zimu. Fatigue Analysis of Joints in a Steel Box-tied Arch Bridge under High-speed Railway Load[J]. High Speed Railway Technology, 2024, 15(4):40-44.

节点进行疲劳分析,通过建立关键铆接节点的局部模型,解决了铁路桥梁铆接部位的疲劳评估问题;针对系杆拱桥局部研究,李侠^[7]对系杆拱桥拱脚局部进行了受力和稳定性分析,通过拱脚处关键节点的疲劳寿命分析得出在考虑结构平均应力的影响后,构件的疲劳寿命有所降低;孙学子^[8]运用有限元方法分析了系杆拱桥在恒载、汽车荷载、混凝土徐变和温度等因素作用下,吊杆应力的变化情况。本文对高速铁路荷载下钢箱系杆拱桥应力集中节点的疲劳性能进行了分

析,研究结果可为后续相关工程提供参考。

1 工程概况

某高速铁路客运专线钢箱系杆拱桥,计算跨径为44.5 m,属于纵横梁体系的无横撑钢箱系杆拱,拱轴线型为二次抛物线,其矢跨比为 1/6,主梁吊杆纵向间距 5 m,采用工字型吊杆。顺桥向一侧设置 2 个多向活动支座,另一侧设置 2 个横向活动支座;拱桥立面布置如图 1 所示。

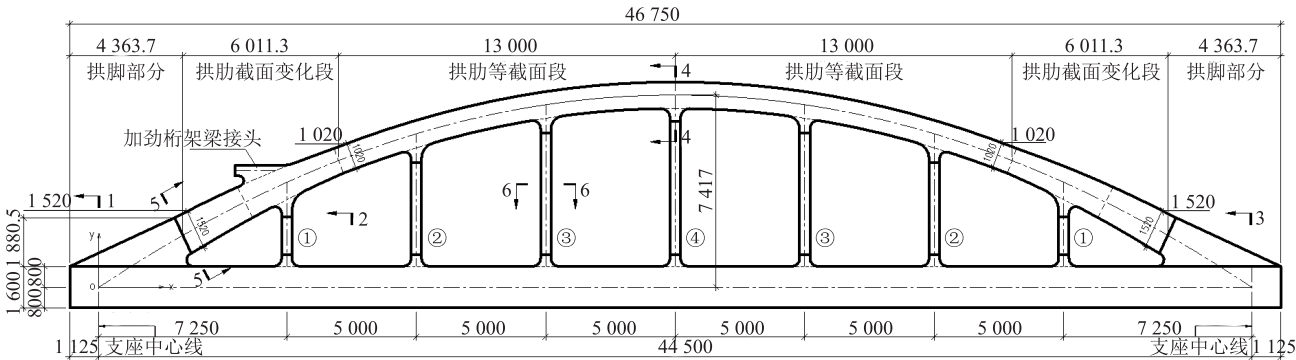


图 1 拱桥立面布置图(mm)

2 有限元模型

采用有限元软件 ANSYS 建模计算,主梁、拱肋及吊杆均采用 Q345qe 钢材,弹性模量 2.1×10^8 kN/m²,泊松比 0.3,密度 7.85 t/m³。既有文献给出了高速铁路运营荷载频值谱和标准疲劳荷载车的求取建议^[9],但本文采用保守计算,以最大荷载的选取原则,计算采取荷载值最大的 ZK 活载作为疲劳车加载,工况如表 1 所示。模型结构拱肋,钢箱采用 SHELL 63 单元,吊杆采用 BEAM 189 单元,行车轨道板采用 SOLID 185 单元。

表 1 工况表

荷载工况	工况详情
工况 1	恒载 + 单向 ZK 荷载
工况 2	恒载 + 同向双 ZK 荷载
工况 3	恒载 + 逆向双 ZK 荷载

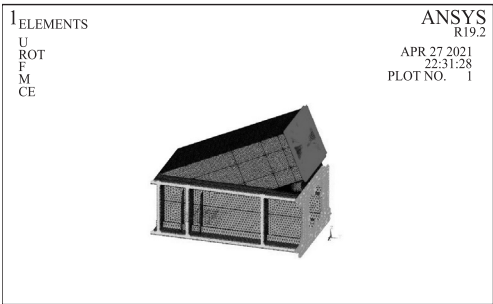
2.1 整桥模型

绘制该桥在恒载作用下结构第一主应力云图,对高速铁路行车状态下各关键部位的应力进行分析^[10],确定桥梁结构受力最不利位置为:拱脚支座处和边吊杆与拱肋连接处。对受力不利位置建立局部模型进一步分析。

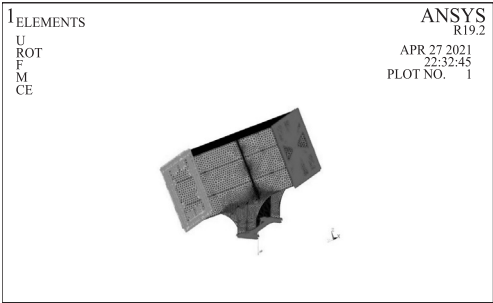
2.2 局部模型

为保证模拟结构的精确性,局部模型采用高阶实

体单元 SOLID 187 模拟,模型如图 2 所示。拱脚局部模型横桥向截面约束采用 6 个自由度,顺桥向截面约束横桥向位移,在拱肋截面处建立刚性梁,刚性梁与截面建立耦合方程,提取荷载施加在刚性梁自由端,施加从整体模型中提取出的截面轴力、剪力、弯矩,同时支座处施加均布支座反力;边吊杆与拱肋连接处模型在拱肋靠近拱脚截面处约束全部 6 个自由度,另一



(a) 拱脚



(b) 边吊杆与拱肋连接处

图 2 局部模型图

侧拱肋截面以及吊杆截面建立刚性梁,刚性梁与截面接触部分建立耦合方程,自由端施加提取应力。

恒载作用状态下整桥模型与局部模型的第一主应力如图 3、图 4 所示。拱脚整桥模型最大主应力位置在支座处,对应局部模型该位置处主应力为 39.55 MPa;局部模型由于边界效应应力集中,最大主应力在主梁断面固结处;边吊杆拱肋连接处的整桥与局部模型最大主应力位置一致,均在拱肋与吊杆相交处。

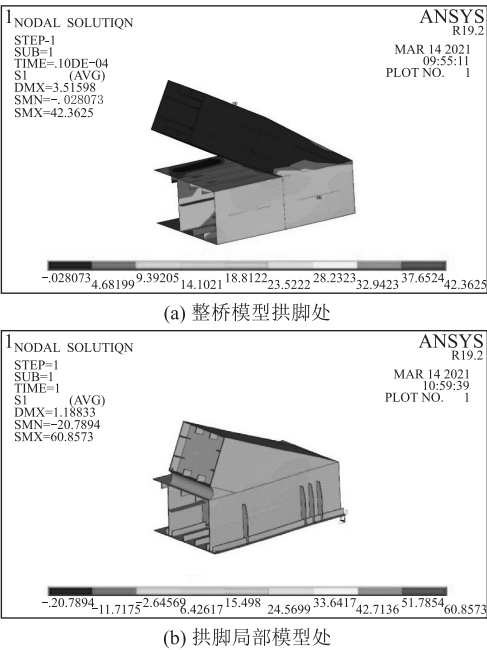


图 3 拱脚处恒载第一主应力对比图

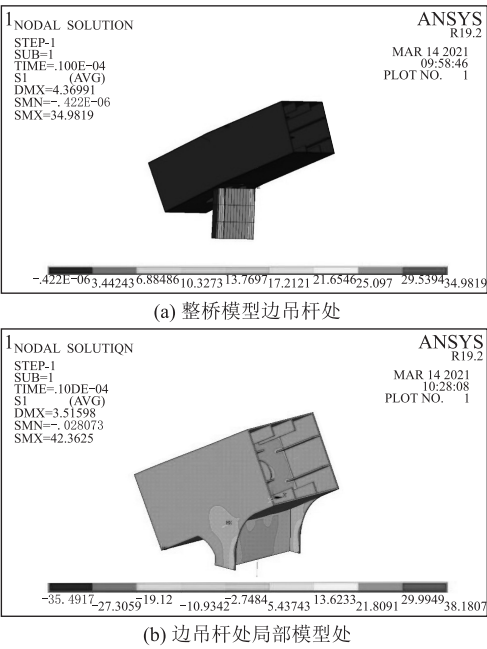


图 4 边吊杆与拱肋连接处恒载第一主应力对比图

整桥模型的拱脚部分在主梁与拱肋之间没有建立导角,因此在主梁与拱肋相交处产生了一个应力较高的区域;整桥模型的主梁箱梁外侧未建立侧翼板,故箱梁外侧腹板从支点到跨中方向主应力有较快的变化。整桥模型的边吊杆与拱肋连接处由于拱肋与吊杆分别采用壳单元与杆单元建立,二者之间通过建立刚性区域进行受力耦合,因此在吊杆受到弯曲时拱肋与吊杆连接处会产生应力集中。

局部模型的精细化建模改善了上述这些问题,使得两处结构受力状态更加接近实际情况。整桥部分与局部模型主应力对比如表 2 所示,拱脚与边吊杆拱肋连接处的整桥模型与局部模型的主应力相差值在 2~4 MPa 之间。考虑到局部模型结构更加精细复杂,且施加应力后边界约束的设置导致局部模型存在边界效应,因此局部模型的最大主应力与整桥模型存在一定偏差,但总体来看两者间误差较小,局部模型建立合理。

表 2 主应力对比表(MPa)

分析位置	整桥部分	局部模型	变化率/%
拱脚(支座处)	42.36	39.55	6.63
边吊杆拱肋连接处	34.98	38.18	9.17

3 节点疲劳分析

将拱脚与边吊杆拱肋连接处局部模型中应力集中节点作为疲劳节点,节点统计及恒载状态下应力值如表 3、表 4 所示。

表 3 拱脚疲劳节点恒载应力表

位置	危险点编号	应力值/MPa
拱肋腹板板肋与主梁顶板相交	G-1	21.00
导角处横隔梁与桥面板纵肋相交	G-2	58.14
支座中间纵向板肋与底板相交	G-3	39.55

表 4 边吊杆拱肋处疲劳节点恒载应力表

位置	危险点编号	应力值/MPa
拱肋钢箱腹板与吊杆工字钢腹板相交	B-1	38.18
横隔板底部靠近腹板与底板交界处	B-2	15.83

结合文献[10]的行车加载方式,对整桥模型分别施加 3 个工况,选取最不利工况的最不利荷载时刻(主应力最大时刻),将这一最不利工况的主应力施加至局部模型中,统计得到 ZK 荷载疲劳车加载下的应力。将这一结果与恒载作用下疲劳节点主应力进行对比,得到节点应力幅差值,结果如表 5 所示。

表 5 节点应力幅差值统计表(MPa)			
位置	疲劳车加载应力	恒载应力	应力差值
G-1	42.54	21.00	21.54
G-2	105.65	58.14	47.51
G-3	76.13	39.55	36.58
B-1	74.00	38.18	35.82
B-2	30.51	15.83	14.68

3.1 规范疲劳评价

根据 TB 10091 - 2017《铁路桥梁钢结构设计规范》^[11]进行疲劳评价。查询可知,研究结构的疲劳容许应力幅类别为 V,其规范疲劳容许应力幅 $\sigma_0=110.3$ MPa。本桥是双线高速铁路桥梁,根据主梁承受的荷载对比规范查找本桥的多线系数 γ_d ,经计算得出 $\gamma_d=1.12$;针对损伤修正系数 γ_n ,桥梁计算跨径 45.5 m,本文研究桥梁采取全线加载,因此 $\gamma_n=1$;对于板厚修正系数 γ_t ,本文研究桥梁的钢箱、顶板以及底板等结构的板厚 $t \leq 25$ mm。查找规范可知, γ_t 取 1。综上所述,得到根据规范推出的疲劳检算公式:

$$1.12 \times 1 \times (\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) \leq 1 \times 110.3 \quad (1)$$

式中: σ_{\max} ——最大应力(MPa);

σ_{\min} ——最小应力(MPa)。

对拱脚和边吊杆拱肋连接处各节点的应力差值代入规范疲劳评价式(1),得到规范评价值后与规范限值,结果如表 6 所示。

表 6 规范疲劳评价表(MPa)			
位置	应力差值	规范评价值	规范限值
G-1	21.54	24.12	< 110.3
G-2	47.51	53.21	< 110.3
G-3	36.58	40.97	< 110.3
B-1	35.82	40.12	< 110.3
B-2	14.68	16.44	< 110.3

由表 6 可知,在 ZK 活载疲劳车荷载下 G-2 疲劳关键节点有最大应力差值,且 5 个节点中,该节点有最大主应力,是最易发生疲劳破坏的危险节点;边吊杆拱肋处模型最危险节点为 B-1 节点。然而,各个疲劳节点的规范评价值均小于规范限值 110.3 MPa,即桥梁结构在运营时期安全,桥梁符合无限寿命的使用规则。

3.2 疲劳理论评价

桥梁采用钢材 Q345qe,属于低中强度钢,根据疲劳理论,疲劳强度降低系数按式(2)计算。

$$K_{\sigma D} = \frac{K_f}{\varepsilon} + \left(\frac{1}{\beta} - 1\right) \quad (2)$$

式中: $K_{\sigma D}$ ——材料疲劳极限降低系数;

K_f ——疲劳缺口应力集中系数;
 ε ——尺寸系数;
 β ——表面加工系数。

应力集中系数考虑了材料的应力集中情况,反映了构件的实际受力状态。本文采用有限元模拟的方法进行受力分析,受力分析与实际情况基本一致,因此应力集中系数 K_f 取 1。研究部位板厚 20 mm,查阅《抗疲劳设计手册》^[12]尺寸系数 ε 取值 0.95,钢材 Q345 的抗拉强度 $\sigma_b=586$ MPa,可知表面加工系数 $\beta=0.63$ 。

由此,可得出考虑应力集中系数、表面加工系数、尺寸效应的材料疲劳极限降低系数 $K_{\sigma D}=1.64$,代入修正疲劳极限计算公式:

$$\sigma_{-1D} = \frac{\sigma_{-1}}{K_{\sigma D}} = \frac{\sigma_{-1}}{1.64} \quad (3)$$

式中: σ_{-1D} ——构件的对称弯曲疲劳极限(MPa);

$K_{\sigma D}$ ——材料疲劳极限降低系数;

σ_{-1} ——材料的对称弯曲疲劳极限(MPa)。

钢材 Q345 的拉-压实验疲劳极限 $\sigma_{-1}=327$ MPa。通过 Goodman 曲线考虑材料平均应力的影响,将考虑其他影响因素的修正疲劳极限代入曲线公式(4)中,得:

$$\sigma_a = \sigma_{-1D} \times \left(1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_b}\right) \quad (4)$$

式中: σ_a ——应力幅(MPa);

σ_m ——平均应力(MPa)。

代入查找及计算出的相关系数,求得计算理论修正的材料疲劳极限:

$$\sigma_a = 199.29 \times \left(1 - \frac{\sigma_m}{586}\right) \quad (5)$$

各个疲劳节点的理论修正疲劳极限在考虑了应力集中、表面加工系数和尺寸效应的同时,还考虑节点的平均应力,平均应力计算式为:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \quad (6)$$

节点平均应力代入式(5)即可得到疲劳理论修正极限,对应力差取一半得应力幅与疲劳极限对比,结果如表 7 所示。

表 7 理论疲劳评价表(MPa)			
位置	疲劳车应力幅	平均应力	理论修正疲劳极限
G-1	10.77	31.77	188.49
G-2	23.76	81.90	171.44
G-3	18.29	57.84	179.62
B-1	17.91	56.09	180.21
B-2	7.34	23.17	191.41

由表 7 可知, G-2 节点有最高的应力水平, 因此该节点有最低理论疲劳极限 171.44 MPa。对比前文规范评价办法, 规范只根据构件连接形式给出疲劳极限, 同应力幅但不同平均应力下的疲劳极限也是相同的, 因此使用疲劳理论评价可根据结构不同的平均应力状态得出不同的疲劳极限, 从而进行更准确的定量分析评价。

3.3 两种评价的对比

为方便对比, 将疲劳规范评价的应力差取一半处理成应力幅, 两种评价结果如图 5 所示。

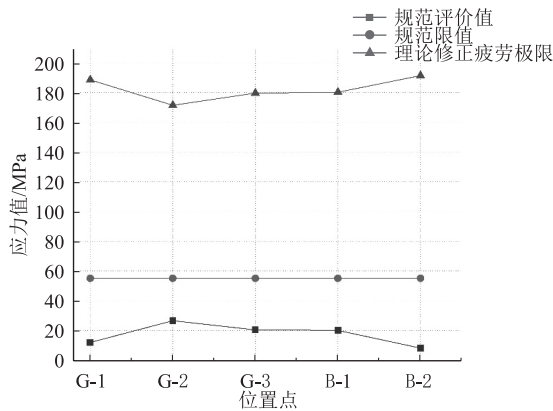


图 5 疲劳节点应力幅对比图

由图 5 可知, 理论疲劳极限约是规范限值的 3~4 倍, 规范所确定的疲劳评价应力幅是远偏于安全的。本文疲劳评价选取 ZK 活载作为疲劳荷载, 所得应力幅远低于规范限值与修正理论疲劳极限, 对比更能反映实际列车重量情况的标准疲劳, 其加载结果必然更加安全。

4 结语

本文通过先整体后局部的建模过程, 分析了高速铁路钢箱系杆拱桥在 ZK 活载作为疲劳验算荷载下的应力集中节点的疲劳使用性能, 得到主要结论如下:

- (1) 拱脚模型 G-2 节点, 即拱脚与主梁连接导角处横隔梁与桥面板纵肋相交点, 具有最大应力差值及最大主应力, 是最易发生疲劳破坏的危险节点。
- (2) 经规范评价与疲劳理论评价分析, 该桥各个应力集中节点均满足无限寿命使用条件, 符合桥梁疲劳性要求。
- (3) 通过对比该桥计算节点的规范限值与理论疲劳极限, 规范规定的疲劳评价应力幅远底于理论安全值, 本着“优化设计, 节约材料”的设计理念, 建议对高速铁路钢箱系杆拱桥的疲劳规范容许值进行进一步

研究和修正, 制定更符合该桥型的规范容许值, 充分发挥材料性能。

参考文献:

[1] 陈良江, 阎武通. 我国铁路桥梁建造技术的成就与展望[J]. 高速铁路技术, 2022, 13(4): 1-7.
CHEN Liangjiang, YAN Wutong. Achievements and Prospects of Railway Bridge Construction Technology in China [J]. High Speed Railway Technology, 2022, 13(4): 1-7.

[2] 王继军, 姚力, 王梦. 中国高速铁路无砟轨道的发展及应用[J]. 高速铁路技术, 2020, 11(4): 33-35.
WANG Jijun, YAO Li, WANG Meng. Development and Application of Ballastless Track of High-speed Railway in China [J]. High Speed Railway Technology, 2020, 11(4): 33-35.

[3] 张清华, 劳武略, 崔闯, 等. 钢结构桥梁疲劳 2020 年度研究进展[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2021, 43(S1): 79-90.
ZHANG Qinghua, LAO Wulue, CUI Chuang, et al. Research Progress on Fatigue of Steel Structure Bridges in 2020 [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2021, 43(S1): 79-90.

[4] 刘均利, 张晋豪. 2007 年~2015 年超载导致桥梁垮塌案例的统计分析[J]. 公路, 2017, 62(4): 79-83.
LIU Junli, ZHANG Jinhao. Statistical Analysis of Bridge Collapse Caused by Overload between Year 2007 and 2015 [J]. Highway, 2017, 62(4): 79-83.

[5] 唐文秋. 应力集中、尺寸和表面对金属疲劳强度影响的研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2008.
TANG Wenqiu. Research on Stress Concentration, Size and Surface Impacting on Metal Fatigue [D]. Shenyang: Northeastern University, 2008.

[6] ALENCAR G, DE JESUS A, DA SILVA J G S, et al. Fatigue Cracking of Welded Railway Bridges: a Review [J]. Engineering Failure Analysis, 2019, 104: 154-176.

[7] 李侠. 下承式钢箱系杆拱桥整体与局部分析及疲劳寿命预测[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2016.
LI Xia. The Overall and Local Analysis and Fatigue Life Evaluation of through Steel Box Tied Arch Bridge [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2016.

[8] 孙学子. 系杆拱桥吊杆的受力分析及寿命预测[D]. 北京: 北京交通大学, 2010.
SUN Xuezi. Stress Analysis and Life Prediction of Suspenders in Tied Arch Bridges [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2010.

[9] 孙伟荣, 李建华, 盛博, 等. 高速铁路桥梁疲劳荷载研究[J]. 结构工程师, 2019, 35(1): 56-60.
SUN Weirong, LI Jianhua, SHENG Bo, et al. Study of Fatigue Load Spectra for High-speed Railway Bridges [J]. Structural Engineers, 2019, 35(1): 56-60.

[10] 江阿兰, 李烨. 基于 ANSYS 的高速铁路钢箱系杆拱桥行车受力分析[J]. 低温建筑技术, 2021, 43(3): 45-50.

量及积雪厚度相差不大,年平均气温从东到西略有降低,即冻结指数由西向东略有增加。从土性条件来看,沿线地表表层大多以砂质黏土或亚砂土覆盖,土性差异不大,因此沿线场地的冻胀量主要受寒季年平均气温即冻结指数的影响。

从14个监测场地总冻胀量来看,前9个场地中除3号场地冻胀量为12 mm外,其余场地冻胀量均小于5 mm,后5个场地冻胀量较大,在8~16 mm之间,场地监测冻胀量呈由西向东增大趋势(如图9所示),其变化规律和气候条件较为吻合。

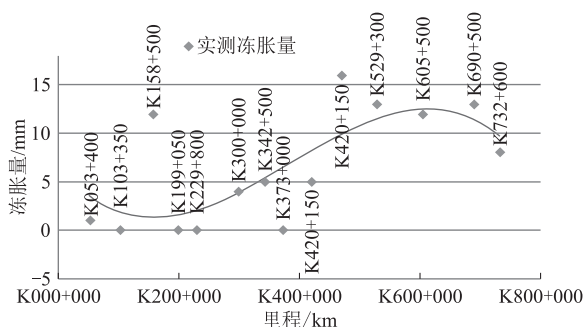


图9 某高铁沿线14个监测场地实测冻胀量变化图

5 结论

(1) 季节性冻土在某高速铁路沿线广泛分布,根据2016—2017年寒季实测资料,有雪条件下沿线最大冻结深度为19~90 cm,平均值为45 cm,其中8~10号场地最大冻结深度大于50 cm,其余场地小于50 cm,有雪条件下监测场地季节冻深普遍小于计算标准冻深值。

(2) 季节冻土开始冻结时间为11月下旬至12月初,2月中旬达到最大冻深,3月上旬至4月中旬完全融化。冻结速率0.27~1.20 cm/d,融化速率0.28~1.92 cm/d,融化速率普遍大于冻结速率。

(3) 积雪对保持土体温度、抑制土体冻结均具有良好效果,能有效缩短冻结、融化过程所需时间,使最大冻结深度减小18%~24%。

(4) 从总冻胀量来看,各天然场地冻胀量较小,前9个监测场地中除3号场地冻胀量为12 mm外,其余场地冻胀量均小于5 mm,后5个监测场地冻胀量较大,在8~16 mm之间,场地监测冻胀量呈由西向东增大趋势,其变化规律和气候条件较为吻合。

参考文献:

- [1] 张先军. 哈大高速铁路路基冻胀规律及影响因素分析[J]. 铁道标准设计, 2013, 57(7): 8-12.
ZHANG Xianjun. Analysis of Frost Heave Laws in Subgrade on Haerbin-Dalian High-speed Railway and Its Influence Factors [J]. Railway Standard Design, 2013, 57(7): 8-12.
- [2] 王茂靖,江凯. 莫斯科喀山高速铁路沿线主要工程地质问题及防治研究[J]. 高速铁路技术, 2018, 9(6): 37-43, 74.
WANG Maojing, JIANG Kai. Main Engineering Geological Problems along and Countermeasures for Moscow-Kazan High-speed Railway [J]. High Speed Railway Technology, 2018, 9(6): 37-43, 74.
- [3] 江凯,冯涛,王茂靖,等. 某高速铁路沿线季节冻土冻胀特性分析[J]. 高速铁路技术, 2017, 8(5): 1-4.
JIANG Kai, FENG Tao, WANG Maojing, et al. Analysis on Frost Heave Characteristics of Seasonal Frost Soil along Moscow-Kazan High-speed Railway [J]. High Speed Railway Technology, 2017, 8(5): 1-4.
- [4] 张东卿,薛元,罗强,等. 俄罗斯某高铁抗冻胀基床结构研究[J]. 铁道工程学报, 2018, 35(4): 29-33.
ZHANG Dongqing, XUE Yuan, LUO Qiang, et al. Research on the Anti-Frost Subgrade Bed Structure of Moscow-Kazan High-speed Railway in Russia [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2018, 35(4): 29-33.
- [5] 刘大园,庞玲,姚力. 莫斯科至喀山高铁轨道设计综述[J]. 山西建筑, 2020, 46(11): 126-127, 184.
LIU Dayuan, PANG Ling, YAO Li. The Track Design Summary of High-speed Railway from Moscow to Kazan [J]. Shanxi Architecture, 2020, 46(11): 126-127, 184.
- [6] 郭建勋,陈列,刘伟,等. 莫斯科至喀山高速铁路桥涵统一跨构通用图设计[J]. 高速铁路技术, 2018, 9(4): 50-56.
GUO Jianxun, CHEN Lie, LIU Wei, et al. Standard Drawing Design on Bridge and Culvert of Moscow-Kazan High-speed Railway [J]. High Speed Railway Technology, 2018, 9(4): 50-56.

(上接第44页)

- JIANG Alan, LI Ye. Driving Force Analysis of High-speed Railway Steel-box Tie-bar Arch-bridge Based on Ansys [J]. Low Temperature Architecture Technology, 2021, 43(3): 45-50.
- [11] TB 10091-2017. 铁路桥梁钢结构设计规范[S].
TB 10091-2017. Code for Design on Steel Structure of Railway

Bridge [S].

- [12] 赵少汴. 抗疲劳设计手册[M]. 2版. 北京: 机械工业出版社, 2015.
ZHAO Shaobian. Anti-fatigue Design Manual [M]. 2nd ed. Beijing: China Machine Press, 2015.