

doi:10.11835/j.issn.2096-6717.2020.053

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



基于 TQI 与沉降关联性分析的高铁路基服役状态监测

陈舒阳¹, 路良恺², 姚永胜^{1,3}

(1. 中南林业科技大学 土木工程学院, 长沙, 410004; 2. 中国铁路设计集团有限公司, 天津 300142; 3. 香港科技大学 土木与环境工程系, 香港 999077)

摘要: 普速铁路常用的有损检测不适用于高铁无砟轨道, 目前, 高铁路基状态检测多依赖于轨检车无损方法, 但轨道质量指数(TQI)仅代表轨道几何状态, 无法直接反映路基服役状态且无法判定病害程度。鉴于此, 以沪宁城际高铁为对象, 采用轨检车检测与工后沉降观测手段, 开展高铁路基服役状态监测研究。在绘制全线 TQI 数据图及工后沉降曲线的基础上, 针对 TQI 与沉降超限做关联性分析, 结合地质雷达、波速仪等下部结构探查, 提出了“TQI+沉降值+下部扫描”比对筛查的高铁路基服役状态监测方法, 并与路基病害工况进行对比验证。结果表明: TQI 异常与沉降超限无互相包含关系, 且极大值区间互不对应; 对比 TQI 超限次数与幅度, 沉降超限与 TQI 超限次数的相关性更大。相比于侧重 TQI 评定的传统方法, 核减了 TQI 超限的非病害工况, 增加了 TQI 未超限的病害工况, 与高铁现场实际工况更相符。

关键词: 高铁路基; 服役状态监测; 轨道质量指数; 工后沉降

中图分类号: U213.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2020)06-0063-08

Service status monitoring of high-speed railway subgrade based on correlation analysis of track quality index and settlement

Chen Shuyang¹, Lu Liangkai², Yao Yongsheng^{1,3}

(1. School of Civil Engineering, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, P. R. China; 2. China Railway Design Group Co., Ltd., Tianjin 300142, P. R. China; 3. Department of Civil and Environmental Engineering, Hong Kong University of Science and Technology, Hong Kong 999077, P. R. China)

Abstract: The commonly used destructive testing of traditional railways ballast track is not suitable for high-speed railway ballast-less track. At present, high-speed railway subgrade status detection mostly depends on the non-destructive method of track inspection car, but the weakness is that the track quality index (TQI) only represents the geometric state of the track, which can't directly reflect the subgrade service status or the severity of the subgrade defects. In view of this, with the Shanghai-Nanjing intercity high-speed railway as the study object, the rail inspection car detection and post-construction settlement

收稿日期: 2019-11-04

基金项目: 国家自然科学基金(41272376, 51908562); 高速铁路基础研究联合基金(U1134207); 铁道部专项(2011G017-C)

作者简介: 陈舒阳(1987-), 男, 博士, 主要从事路基工程、地质灾害防治研究, E-mail: johnson.csy@foxmail.com.

Received: 2019-11-04

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 41272376, 51908562); NSFC Joint Foundation of High-Speed Railway Fundamental Research (No. U1134207); Development Project of Ministry of Railways (No. 2011G017-C)

Author brief: Chen Shuyang (1987-), PhD, main research interests: subgrade engineering, prevention and mitigation for geological disaster, E-mail: johnson.csy@foxmail.com.

observation were conducted to carry out the study on the service status monitoring of high-speed railway subgrade. On the basis of TQI statistical diagram and post-construction settlement curve of the whole line, the correlation analysis of TQI and settlement overruns was carried out, combined with the exploration of under structures such as geo-radar and wave velocity survey, a new service status monitoring method of the high-speed railway subgrade based on the comparison screen of "TQI + settlement value + under-scan" was proposed, while the condition of the subgrade defects was also verified. The results showed that there was no mutual inclusion relation between the overruns of TQI and settlement, and the maximum value didn't correspond to each other. By comparing the frequency and value of TQI overruns, the settlement overruns were more correlated to the frequency. Compared with the previous TQI oriented assessment method, the non-defected conditions with TQI overruns were reduced, and the defected conditions without TQI overruns were increased, which is more consistent with the actual site conditions of high-speed railway. For other in-service high-speed railways which may be greatly affected by the settlement of the soft ground and with a higher proportion of the subgrade, this study can also provide some useful reference for the service status monitoring of them.

Keywords: high-speed railway subgrade; service status monitoring; track quality index (TQI); post-construction settlement

自中国实行既有铁路提速改造起,路基状态评估被专门提出^[1],以满足提速后对路基强度、刚度及养护维修等的新要求。在评估检测手段上,早期主要采用静力及动力触探、贯入试验、电测法、核子密度湿度测试等方法,但上述方法需侵入道床,干扰行车,属有损检测,且仅能反映局部问题^[2-3]。后来借鉴了发达国家经验,引入波速仪、轨检车、车载雷达等无损检测^[3-5],可快速检测路基全线状态。在应用范围上,路基状态评估不局限于既有铁路提速改造,也在重载铁路、高铁新线建设(紧邻既有铁路施工等)上得以推广^[4-6]。在评估指标上,从以往重点关注的强度、刚度等^[7-8]过渡至涵盖路基几何尺寸、含水率、地质条件、压实度 K 、地基系数 K_{30} 、变形模量 E_{v2} 、动态变形模量 E_{vd} 等诸多内容^[8-9]。由此可见,铁路路基状态评估检测研究经历了从无到有,从有损到无损,从既有铁路改造到新线建设,从考察单一指标到多维度指标的发展过程^[10-11]。

路基状态监测的目标已从既有铁路时期为满足提速要求转变为及时发现病害并指导运营方案调整。在检测手段上,因无砟轨道不适宜采用有损检测,目前,中国高铁多依赖以轨检车为主的无损检测。但问题在于,检测结果轨道质量指数(TQI)值只是反映轨道几何状态的标准差,仅具有统计学意义而无物理力学意义^[12-13],无法作为定性路基病害或判定其成因的依据,造成 TQI 是否异常与高铁路基状态

优劣并无明确对应关系^[14-15]。此外,在高铁长期运营中,路基病害与工后沉降、结构形式、气象条件、紧邻既有铁路运营^[15]、养护维修^[16]等多重因素相关,既有全线特征又有局部差异,故仅采用 TQI 反映上述内容显然不合理。鉴于此,有必要将轨检车与其他检测手段、调查方法相结合,通过多层筛查与逐级比对,明确高铁路基服役状态监测项目及判定标准,提升监测分析精度,为及时定性路基病害、合理选择维修方案及调整优化轨检车动检参数等提供参考。

1 研究区依托工程介绍

1.1 工程概况

沪宁城际高速铁路位于上海市、江苏省境内,正线全长 300.2 km,设计时速 350 km/h,正线全部采用无砟轨道,线间距 4.8 m,最小曲线半径 2 200 m,最大坡度 20‰,到发线有效长 650 m。全线设置上海、苏州、无锡、常州、镇江、南京等 21 个车站(如图 1)。其中,路基工程占全线比例 33.6%,在中国已建成通车的高速铁路中路基比例最高。该工程地处长江下游平原、太湖冲击平原,湖泊密布、河谷纵横,为亚热带季风气候,全年降水量大,台风、暴雨等极端天气事件频发。全线途径地区多为深厚软土地基,主要采用桩筏、桩网复合地基等处理方式,建设工期仅 19 个月。工程周边地区人口密度极高,地表

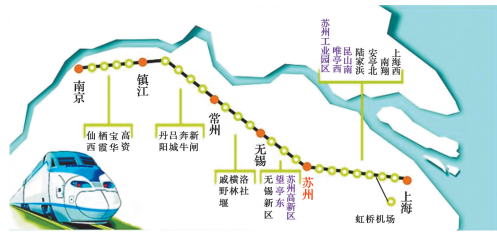


图 1 沪宁城际高速铁路交通路线示意图

Fig. 1 Diagram of traffic route of Shanghai-Nanjing intercity high-speed railway

表 1 地基土物理力学指标

Table 1 Physico-mechanical indexes of sub-soil

层 序号	含水率 $\omega/\%$	重力密度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	孔隙 比 e	压缩模量 E_{s1-2}/MPa	快剪		标贯试验 $N/\text{击}$	锥尖阻力 q_c/MPa	变形模量 E_0/MPa
					c/kPa	$\varphi/(\text{^\circ})$			
(1)	24.40	19.3	0.612	4.54	29.24	6.64	3.2	1.66	6.84
(2)	26.00	18.6	0.673	9.12	69.65	27.45	3.5	1.08	20.51
(3)	24.70	17.3	0.621	4.63	20.70	3.82	4.5	0.51	21.76
(4)	22.60	19.4	0.575	10.86	4.72	22.34	4.4	1.68	25.77
(5)	21.00	21.0	0.607	14.46	43.82	16.47	6.5	4.02	36.39

试验段加固区主要为硬塑状态粉质黏土,下卧区主要为软弱土层和流塑、软塑状态粉质黏土,土层自上而下主要由 5 层组成:1)Q_{4ml}人工填土,灰褐色,硬,表层为种植土,含少量植物根系,厚约 2.8 m,极限承载力 $P_u=440.35 \text{ kPa}$;2)Q_{4al+pl}粉质黏土,灰色,软塑,厚约 2.4 m,极限承载力 $P_u=601.32 \text{ kPa}$;3)Q_{4al}粉质黏土夹淤泥,灰色,软塑~流塑,主要成份为粘粒,含少量腐殖质,厚约 3.4 m,极限承载力 $P_u=473.57 \text{ kPa}$;4)Q_{4al}粉质黏土,灰褐色,粘性较强,成份以粘粒为主,粉粒次之,厚约 4.3 m,极限承载力 $P_u=784.54 \text{ kPa}$;5)Q_{3al}黏土,灰色,厚约 12.6 m,极限承载力 $P_u=440.35 \text{ kPa}$ 。

2 现场监测与数据整理

2.1 测试项目介绍

在下部结构形式上,高铁路基除填方路堤外,还包含挖方路堑、半填半挖路基、过渡段(路基~桥梁、路基~隧道、路堑~路堤等)及站场等;在上部轨道结构上,存在直轨、尖轨、道岔、弯道等不同轨道形式;不同结构形式对应的设计施工、养护维修等均不同,因此,造成路基沉降变形、病害情况等差异明显。依托沪宁城际高铁,在以轨检车为常规检测的基础上,以路基病害调查、路基结构设计施工方案校对、灾害现场调查资料复核等为辅助,从动态、静态、全线、局部等几个维度,开展以下测试分析:1)全线常

开挖、地下水开采、深基坑施工等人类工程活动影响频繁。

1.2 工程地质条件

工程所处区域为海相冲积平原,地势平坦,形成历史久远,沿线鱼塘、沼泽、沟渠较多,路基下伏 2~6 m 不等的淤泥质黏土,地质情况复杂。地基物理学指标如表 1 所示。

规监测,基于轨检车动检 TQI 数据;2)全线长期监控,采用间隔 1 a/次的人工测绘进行工后沉降观测;3)路基下部结构扫描,地质雷达、波速仪检测,探查结构空洞与水力通道。

2.2 监测数据及探查结果

2.2.1 全线常规检测:轨检车 TQI 动检 分别以 K22、K298 为记录起点与终点里程,根据连续 22 期沪宁城际全线轨检车动检数据(见图 2),在全线 1 385 个测试段中,共累计 424 段次 TQI 超限(规范^[16]标准为 $TQI \geq 5$),整体超限率为 1.39%。

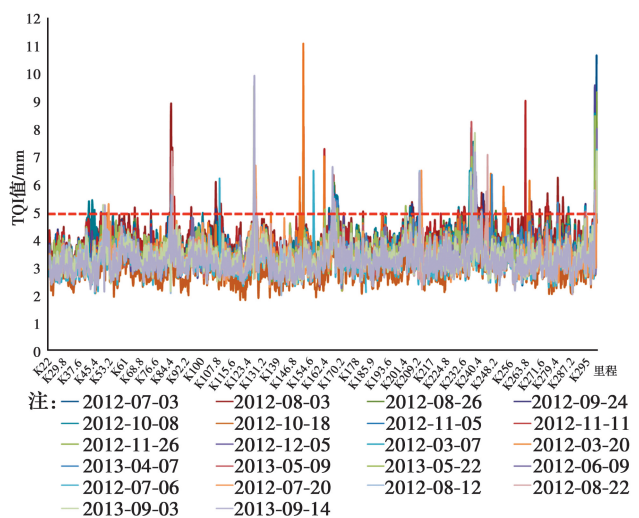


图 2 全线轨检车动检数据统计图

Fig. 2 Statistical diagram of track inspection car along the whole line

其中,按 1 km 里程桩号进行统计,沪宁城际高铁 TQI 超限范围,共分布在 K73、K125、K166、K235、K298 等 73 个区段,按结构形式划分:44 段为路基(含过渡段),极大值位于 K126 区段, $TQI_{max} = 10.0$;29 段为桥隧及道岔区,极大值位于 K151 区段, $TQI_{max} = 11.2$ 。由于桥隧及站场道岔区在沉降、病害机理方面均与路基不同,且本文以高速铁路为对象,故暂不讨论路基以外的结构形式。以下分别以 TQI 超限次数与幅度排序,排名前 10 位路基区段情况如表 2~表 3 所示。

表 2 TQI 超限次数前 10 位路基区段

Table 2 Top 10 subgrade sections with TQI overruns frequency

里程	结构形式	超限次数	TQI_{max}/mm
K236	路桥过渡段	22	8.3
K237	路基	20	7.6
K238	路基	19	7.9
K166	路桥过渡段	16	6.4
K235	路基	16	6.6
K126	路桥过渡段	15	10.0
K168	路桥过渡段	12	5.6
K165	路基	11	6.6
K298	路基	11	9.6
K84	路基	9	9.0

表 3 TQI 超限幅度前 10 位路基区段

Table 3 Top 10 subgrade sections with TQI overruns value

里程	结构形式	TQI_{max}/mm	超限次数
K126	路桥过渡段	10.0	15
K298	路基	9.6	11
K263	路桥过渡段	9.1	1
K84	路基	9.0	9
K236	路桥过渡段	8.3	22
K83	路基	8.2	1
K238	路基	7.9	19
K237	路基	7.6	20
K244	路桥过渡段	7.1	1
K235	路基	6.6	16

2.2.2 全线长期监控:工后沉降观测 与每两周进行一次轨检车检测相比,工后沉降现场监测的间隔期较长(约 1 a/次),故更能反映路基长期累积变形的情况。观测方案采用水准断面监测法,通过与原测高差对比分析,在沉降观测区段两端选取稳定

的 CPⅢ点作为监测基准点,结合沉降区域对水准线路中相邻 CPⅢ点校核观测,采用后-后-前-前的观测方案(见图 3),对沪宁城际全线范围内所有监测点进行连续观测,由此绘制沉降观测曲线。

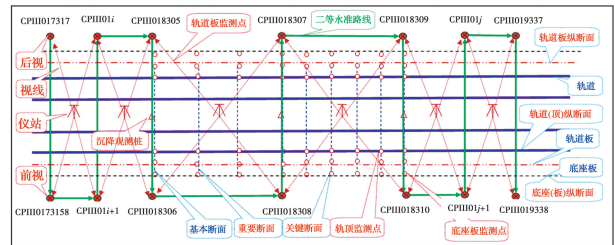


图 3 沉降观测方案及水准监测点布设示意图

Fig. 3 Settlement observation scheme and benchmark monitoring layout diagram

以测试期限内 22 次轨检车动检的起始与最终测试为界限,根据连续 2 期沪宁城际全线纵断面工后沉降观测曲线(见图 4),得知沪宁城际高铁共计在 K81、K147、K165、K230、K235、K236、K238、K266、K279 等 9 个区段沉降超限(≥ 15 mm),且结构形式全部为路基。其中,极大值出现在 K235 区段,最大沉降值为 29.6 mm。此外,考虑到沉降值有增大趋势,另增加了诸如 K49、K206、K288 等 12 个沉降临超限(10~15 mm)区段作为对比工况,分析其与 TQI 超限的相关性。

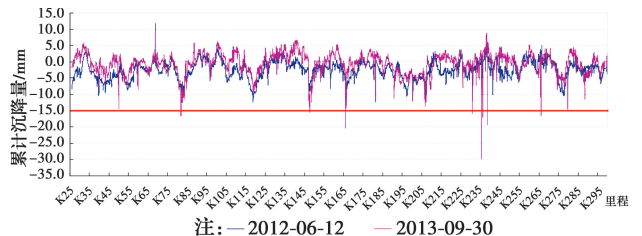


图 4 全线纵断面沉降观测曲线

Fig. 4 Settlement monitoring curve in the longitudinal profile of the whole line

2.2.3 下部结构探查:地质雷达与波速仪探查 鉴于 TQI 与沉降超限存在互不包含,极大值不对应等情况,为判别路基服役状态与病害现象与 TQI 或沉降超限的关系,故需要进一步引入其他检测手段。对沪宁城际高铁研究区段,针对 TQI 与沉降超限路段,分为“均超限、其中一项超限”共 3 类组合关系,增加地质雷达(图 5)、波速仪(图 6)等无损检测探查,通过路基下部的扫描影像,确定路基下部结构是否存在掏蚀、空洞等情况,同时校核路基病害的现场记录。

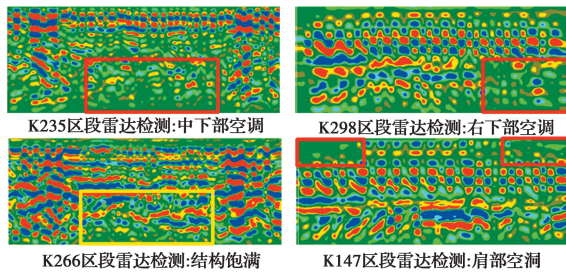


图 5 雷达检测路基下部结构示意图

Fig. 5 Subgrade's substructure diagram detected by ground penetrating radar

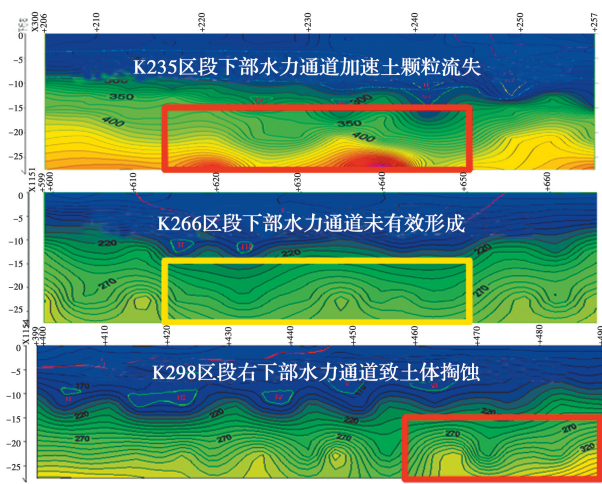


图 6 波速仪检测路基下部土层与水力通道

Fig. 6 Subgrade's substructure soil layer and hydraulic channel by wave velocity detection

从检查结果上分析,对于扫描发现路基下部结构存在空洞的区段,会伴随有动水压力的变化过程。在形成水力输送通道后,会加速路基下部土体的掏蚀破坏,造成桩间土或桩承下卧层的土颗粒流失,从而导致土骨架结构松散甚至破坏,轻则造成土体变形加剧,重则发生整体失稳或强度破坏。从下部结构的空洞位置看,主要分为中下部空洞(如 K235 区段)、单侧空洞(如 K298 区段)、肩部空洞(如 K147 区段)等几类典型工况。其中,空洞范围越大,水力通道的渗透压越大,对应的上部结构变形及 TQI 或沉降超限情况也越严重,并会有不同程度的路基病害发育。

3 监测对比分析与筛查方法

3.1 采用 TQI 超限单标准判定的弊端

在现行的高铁运营中,针对此类区段,运营部门往往依据 TQI 超限即判定路基服役状态不佳。但由于 TQI 仅具有统计学上的意义,对于存在何种路

基病害,是否需要进行运营方案调整或补强施工等,无法根据 TQI 超限进行判别。由此,造成处治方法、运营方案调整等措施难以正确制定或缺乏有效依据。因此,采用 TQI 超限单标准判定路基状态不良或存在病害,易造成“安全”的“超限区段”被过度干预,或“危险”的“未超限区段”被人为疏忽,导致或无法解决病害问题,或对运输秩序造成破坏,在安全和经济层面效果均不理想。

但另一方面,从成本和效率上考虑,由于轨检车动检每两周即可进行一次,能够迅速获取全线 TQI 数据,速度快且可操作性强,对运营干扰小。因此,轨检车作为高铁路基状态常规检测手段,视为门槛最低的第一道筛选仍然是必要的。建议在沿用频度为 2 周/次的轨检车动检的基础上,着重关注 TQI 值异常幅度和次数。

3.2 沉降超限与 TQI 超限关联性分析

对比发现,沉降超限与 TQI 超限的区间并不完全吻合,且出现极值的区间也互不对应。在沉降最大的 K235 区段, $TQI_{max}=6.6$,累计超限 16 次;出现 TQI 极值的 K126 区段,最大沉降值为 7.0 mm(未超限);而在沉降超限次数最高(22 次)的 K236 区段,最大沉降值为 16.9 mm。

通过比较工后沉降超限(≥ 15 mm)与临超限(10~15 mm)区段的 TQI 值后发现,TQI 超限率分别为(6/9)66.67%与(6/13)46.15%,反观 TQI 超限区段对应的沉降超限率仅为(7/44)13.64%,说明工后沉降增大与 TQI 超限率的上升正相关,但 TQI 超限仅有小部分表现为沉降超限,而沉降超限也非导致 TQI 异常的必要条件。

经数据对比发现,TQI 异常与沉降超限区间并不吻合,且无互相包含关系,故 TQI 异常与沉降超限并无必然性因果关系。但从二者吻合率上分析,沉降超限区段的 TQI 超限率为 66.67%,而 TQI 超限区段的沉降超限率为 13.64%。由此,从二者交集的情况反映出,TQI 超限的表现形式和原因更复杂,沉降超限仅是一小部分;而沉降超限则相对表现出较多 TQI 超限工况。

为对比沉降超限和 TQI 超限次数与幅度的相关性,采用两种方法进行对比验证:1)在 TQI 超限次数与幅度前 10 位的区段中,沉降超限区段分别为 4 段、3 段;2)在沉降与 TQI 均超限的 6 个区段中,针对沉降超限区段所对应的 TQI 超限频次与幅度

在整体 44 个 TQI 超限区段中的排序进行加权计算,结果分别为 11、12.25。由此均可说明,沉降超限与 TQI 超限频次的相关性更高。

从 TQI 与沉降超限产生分化的原因上分析,主要在于:1)TQI 主要反映轨道几何状态,是不同区段的标准差离散程度的统计和,与路基的沉降值的对应关系不明确;2)TQI 异常不一定由工后沉降超限引起,可能与道岔密集分布、极端气候频发等其他因素相关;3)工后沉降超限可能与区域沉降相关,或沉降区段在天窗期维护中进行过轨道扣件调整,且 TQI 是否异常与日常维护对应关系并不明确;4)路基补强施工效果反映在沉降观测结果上有滞后性,而轨道抬升过程反映在 TQI 上会存在趋于正常或发生突变两种可能;5)轨检车检测存在随机性,某一次 TQI 检测异常可能与轨检车辆自身运行时产生偶然波动等相关。

3.3 典型超限工况分析与监测筛查方法

为判别路基服役状态与病害现象与 TQI 或沉降超限间的对应关系,在分为“二者均超限、其中一项超限”共 3 类组合关系的基础上,结合地质雷达、波速仪等局部检测探查,同时校核路基病害的现场记录。经检测调查分析,沪宁城际存在 6 类典型工况:1)TQI 与沉降均超限的病害区段。以 K235 区段为代表: $TQI_{\max}=6.6$,超限次数为 16,工后沉降 29.6 mm,经地质雷达与波速仪检测,显示下部结构掏蚀较严重,中部存在空洞。现场调研后发现,周边存在居民抽水及地下溶洞影响。本期监测后,铁路部门在夜间天窗时间进行花管注浆与旋喷桩支护的补强施工,并执行日间行车限速 80 km/h 的运营方案调整。2)TQI 与沉降均超限的非病害区段。以 K266 区段为代表: $TQI_{\max}=5.4$,超限次数为 1,工后沉降 16.5 mm,经地质雷达与波速仪检测,显示下部结构饱满。现场调研后发现该区段曾因涵洞堵塞发生江水倒灌,水位漫至涵洞口顶面,造成部分路基下伏土层软化,后期进行抽水作业后该段路基沉降得到控制,TQI 在出现该次偶然小幅超限后,后续未再出现超限情况。3)TQI 正常但沉降超限的病害区段。以 K147 区段为代表: $TQI_{\max}=4.9$,工后沉降 15.5 mm,经地质雷达与波速仪检测,显示路基下部两侧肩部存在波形杂乱现象。经调查,该段为挖方路堑且两侧边坡较高,发生过路堑边坡溜坍病害;工后沉降超限的原因分析为该区段所处太湖流域的区

域沉降普遍较大,但相邻区域的差异沉降小,由此反映在 TQI 上波动不明显。4)TQI 正常但沉降超限的非病害区段。以 K81 区段为代表: $TQI_{\max}=4.6$,工后沉降 16.5 mm,经地质雷达与波速仪检测,显示下部结构饱满。因该区段同样处在太湖流域,故类似于 K147 等区段,区域沉降较大是造成工后沉降超限的主因,但由于 TQI 波动小,加之无明显路基病害发育,故该区段路基状态较好。5)沉降正常但 TQI 超限的病害区段。以 K298 区段为代表: $TQI_{\max}=9.6$,超限 11 次,工后沉降 2.3 mm,经地质雷达与波速仪检测,显示下部右侧有明显空洞。经现场调查,该段受线路北侧地铁基坑施工影响,出现路基土体向一侧明显倾斜的现象。现场病害勘查显示,后经旋喷桩水泥土隔渗墙施工补强后,路基右下部空洞得到控制,TQI 值回落到 3~5 区间。6)沉降正常但 TQI 超限的非病害区段。以 K263 区段为代表: $TQI_{\max}=9.1$,超限次数为 1,工后沉降 3.7 mm,经地质雷达与波速仪检测,显示下部结构基本饱满。经气象资料查询,推断该年份 8 月出现 TQI 大幅超限可能与台风登陆天气有关,而在其余运营时段,TQI 值基本维持在低水平且波动较小。

综上所述,在以上各类典型工况的分析中,针对 TQI 与沉降均超限或二者其一超限工况,可酌情增加路基下部扫描检测,进一步确定是否存在结构空洞并复核病害记录,进而判定路基服役状态并对病害定性,即形成“TQI+沉降值+下部影像”的多层比对、逐级筛选的综合监测方法。在 TQI 与沉降均不超限时,可初步判定路基服役状态较好并复核资料明确路基病害不发育;而对二者任一项或均超限情况,需适当增加下部扫描,若存在结构空洞或水力通道,则初步判定路基服役状态不良,并结合现场资料对病害定性。

相比于现有单纯 TQI 评判,改进后的方法可有效区分在原方法认为路基状态不良或有病害的 1)、2)、5)、6)典型工况中,核减诸如 2)、6)等非病害工况;此外,也能进一步甄别新增例如工况 3)、4)等原方法认定的正常区段中的服役状态不良区段。由此,可有效改善单标准 TQI 评判的弊端,监测分析结果更加符合工程实际。在现行高铁运营仍以轨检车为主要常规检测方法的背景下,可为进一步优化轨检车动检参数,确定处治方案和运营调整等提供决策支持。

4 结论

针对目前轨检车 TQI 值无法明确反映高铁运营条件下路基服役状态的现状,以常规轨检车动检为基础,结合现场沉降观测数据与 TQI 对比分析,并以波速仪、地质雷达等检测手段等局部探查为辅助,依托沪宁城际高铁开展高铁路基服役状态监测研究,主要结论如下:

1)通过全线动态轨检车检测、沉降观测、路基下部结构探查等手段,实现了在监控全线服役状态的同时,对局部路基病害工况的复核,将在役运营高铁路基状态监测从现有 TQI 检测为主的基础上,发展至多层比对的逐级筛查方法。有助于提升监测的可靠性,可为优化轨检车动检参数,合理判定路基病害及选择维修方案等提供参考。

2)监测数据表明,TQI 与沉降超限无互相包含关系,且极大值区段不对应;偶然性 TQI 超限与沉降超限的关联性较小,但 TQI 重复超限则与沉降超限相关性较大;沉降超限(>15 mm)比临超限($10\sim 15$ mm)区段的 TQI 超限率高出约 20%,但 TQI 超限段的沉降超限率不足 15%;对比 TQI 超限次数与幅度,沉降超限与其次数相关性更大,建议实际监测可增加对 TQI 超限频次的关注。

3)提出了“TQI+沉降值+下部扫描”逐级筛查的路基服役状态监测方法,改善了传统方法仅依靠 TQI 评判路基状态及病害的弊端,核减了 TQI 超限的非病害工况,增加了 TQI 未超限的病害工况,分析结果与沪宁城际高铁现场工况相符,该方法对软土地基沉降影响较大且路基比例较高的在役高铁路基服役状态监测有一定参考价值。

4)在现行仍主要依赖轨检车作为常规检测的背景下,对于实际路基服役状态监测建议为:TQI 如果是散发的低频次或低幅度超限,且没有明显波动性,可考虑不复核沉降值;若 TQI 超限次数或幅值较大,则建议参考复测的沉降值;若沉降超限或有增大趋势,且 TQI 超限维持高频次或大幅度超限,建议补充路基下部结构扫描。

参考文献:

[1] 张千里,韩自力,史存林,等. 既有线提速路基检测评估技术[J]. 中国铁路, 2002(8): 32-33, 4.
ZHANG Q L, HAN Z L, SHI C L, et al. Inspection and evaluation technology of roadbed of existing speed

increased lines [J]. Chinese Railways, 2002(8): 32-33, 4. (in Chinese)

- [2] 王敏,李义杰,徐林荣. 高铁路基动载沉降现场监测分析[J]. 土木建筑与环境工程, 2017, 39(6): 22-29.
WANG M, LI Y J, XU L R. Field monitoring and analysis of dynamic load settlement of high speed railway subgrade [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2017, 39(6): 22-29. (in Chinese)
- [3] 董亮,赵成刚,蔡德钧,等. 高速铁路无砟轨道路基动力特性数值模拟和试验研究[J]. 土木工程学报, 2008, 41(10): 81-86.
DONG L, ZHAO C G, CAI D G, et al. Experimental validation of a numerical model for prediction of the dynamic response of ballastless subgrade of high-speed railways [J]. China Civil Engineering Journal, 2008, 41(10): 81-86. (in Chinese)
- [4] 柯在田,齐法琳,邓普. 不同埋深铁路路基隐伏岩溶病害的地质雷达检测方法[J]. 中国铁路, 2017(10): 1-7.
KE Z T, QI F L, DENG P. GPR method to detect covered Karst disease of deeply buried railway subgrade [J]. China Railway, 2017(10): 1-7. (in Chinese)
- [5] 路良恺,徐林荣. 软基高铁 TQI 与路基沉降对比研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2016, 13(3): 430-434.
LU L K, XU L R. Comparative study on the TQI and subgrade settlement of the high-speed railway in soft soil foundation [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2016, 13(3): 430-434. (in Chinese)
- [6] LIN C, LU J H, JIANG Y M, et al. Stochastic delay analysis for train control services in next-generation high-speed railway communications system [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2016, 17(1): 48-64.
- [7] 陈云敏,边学成. 高速铁路路基动力学研究进展[J]. 土木工程学报, 2018, 51(6): 1-13.
CHEN Y M, BIAN X C. The review of high-speed railway track foundation dynamics [J]. China Civil Engineering Journal, 2018, 51(6): 1-13. (in Chinese)
- [8] 梁胤程,杜翠,刘杰,等. 铁路路基状态检测中探地雷达数据并行处理[J]. 中国铁道科学, 2017, 38(2): 11-18.
LIANG Y C, DU C, LIU J, et al. Research on parallel processing method for ground penetrating radar data in state detection of railway subgrade [J]. China Railway Science, 2017, 38(2): 11-18. (in Chinese)

- [9] 陈善雄, 王小刚, 姜领发, 等. 铁路客运专线路基面沉降特征与工程意义[J]. 岩土力学, 2010, 31(3): 702-706, 726.
- CHEN S X, WANG X G, JIANG L F, et al. Settlement characteristics and engineering significance of subgrade surface for railway passenger dedicated line [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(3): 702-706, 726. (in Chinese)
- [10] LIN W W, YODA T, TANIGUCHI N. Effects of bridge accessories in steel-concrete composite railway bridges in service condition [J]. Journal of Bridge Engineering, 2016, 21(2): 1505-1512.
- [11] KIM S G, KIM D H. Development and application of LOS (level of service) for accessibility to railway stations [J]. Journal of the Korean Society of Civil Engineers, 2016, 36(1): 115-120.
- [12] GARY R, ERNEST T. Ground-penetrating radar evaluation of railway track substructure conditions [C]//Proc SPIE 4758, Ninth International Conference on Ground Penetrating Radar, 2002: 48-53.
- [13] KANTOR G, HERMAN A, SINGH H, et al. Automatic railway classification using surface and subsurface measurements [C]//7th Conference on Field and Service Robotics, Helsinki, Finland, 2016: 243-248.
- [14] GALLAGHER G, LEIPER Q, CLARK M. Ballast evaluation using ground-penetrating radar [J]. Railway Gazette International, 2010(2): 188-189.
- [15] 左坤, 徐林荣. 高速铁路建设对紧临既有线路基服役状态影响的动力测试分析与对策[J]. 铁道学报, 2013, 35(6): 82-90.
- ZUO S, XU L R. Dynamic analysis on influence of high-speed railway construction on existing adjacent railway lines and countermeasures [J]. Journal of the China Railway Society, 2013, 35(6): 82-90. (in Chinese)
- [16] 高速铁路无砟轨道线路维修规则(试行): TG/GW 115—2012 [S]. 北京: 中国铁道出版社, 2012:112-113
- Maintain rules for ballastless high speed railway: TG/GW 115-2012 [S]. Beijing: China Railway Press, 2012:112-113. (in Chinese)

(编辑 胡玲)