

基于 TQI 与路基沉降关联性分析的路基服役状态评估 ——以沪宁城际铁路为例

刘 凯

中南林业科技大学 湖南长沙

【摘要】作为我国最繁忙的高速铁路之一，沪宁城际铁路每次轨检车动态检测间隔一般为 2 周/次，沉降监测平均 6-9 个月甚至超过一年才一次，且因软土地基结构之故，极易发生较快速率的沉降，故相比于常态化高频次的轨检车动态监测，高速铁路路基沉降监测数值存在时间迟滞性问题。而 TQI 在实际应用中，对于沉降超出 200m 的区域，其敏感性反映不甚明确，故无论是路基沉降的监测频次还是里程上检测的精确度，对高铁实际运营指导下做出的判定与高铁安全性、高效性等应用目标之间会有脱节问题。据此，本文将基于 TQI 与路基沉降之间的关系，探讨其对高速铁路路基服役状态的预测可行性，旨在为高速铁路运输的安全性、高效性和稳定性提供了一定的保障。

【关键词】TQI; 路基沉降; 关联性分析; 路基服役状态

【收稿日期】2023 年 5 月 5 日 **【出刊日期】**2023 年 6 月 20 日 **【DOI】**10.12208/j.jer.20230015

Evaluation of roadbed service status based on the correlation analysis between TQI and roadbed settlement——Take Shanghai–Nanjing intercity railway as an example

Kai Liu

Central South University of Forestry and Technology, Changsha, Hunan

【Abstract】As one of the busiest high-speed railways in China, the dynamic detection interval of each rail inspection vehicle on Shanghai–Nanjing intercity railway is generally 2 weeks/time, and the settlement monitoring is only once every 6-9 months or even more than a year on average. Moreover, due to the soft soil foundation structure, it is very easy to have a relatively rapid rate of settlement. Therefore, compared with the normal high-frequency rail inspection vehicle dynamic monitoring, the high-speed railway subgrade settlement monitoring value has the problem of time lag. In practical applications, the sensitivity of TQI is not very clear for areas with settlement exceeding 200m. Therefore, whether it is the monitoring frequency of roadbed settlement or the accuracy of mileage detection, there may be a disconnect between the judgments made under the guidance of high-speed rail operation and the application goals of high-speed rail safety and efficiency. Based on this, this article will explore the feasibility of predicting the service status of high-speed railway subgrade based on the relationship between TQI and subgrade settlement, aiming to provide certain guarantees for the safety, efficiency, and stability of high-speed railway transportation.

【Keywords】TQI; Roadbed settlement; Correlation analysis; Service status of roadbed

随着城镇化的发展，我国轨道交通行业也在政策及技术的支持下得到了蓬勃的发展。现如今，不仅各种交通运输基础设施数量和建设水平得到了提升，而且以城际铁路为代表的事业，更是迎来了崭新的发展机遇，其总里程持续增加、轨道路网愈加

完善，为人民生活和生产提供了极大的便利。然而值得注意的是，伴随着时代的发展，我国最早一批建设的城际铁路开始进入病害多发期，路基承载力和完整性等指标也难以满足现代交通对城际铁路的多样化需求，因此评估轨道路基的服役状态，成为

影响我国城际铁路服务质量的重要因素之一。

而轨道质量指数 (TQI)，作为一项涉及轨道动态检测的数据统计结果，为区段轨道整体质量进行综合评估提供了一个较为系统、全面的参考依据，为保证轨道状态的均衡发展提供科学依据。基于此，本文将沪宁城际铁路为例，从 TQI 的七个分项指标入手，研究其与路基沉降（沉降量采用的是 CPIII 现场监测沉降数据）之间的关系，通过后期数据进行沉降预测和误差分析，对路基服役状态加以评估，旨在提出一项关于铁路轨道不平顺的新的质量评定准则作为后期工程实际应用中的理论参考。

1 沪宁城际铁路路基现状

1.1 沪宁城际铁路工程概况

沪宁城际铁路，是一条连接上海市与江苏省南京市的城际铁路，为实现从上海至南京一小时通达，其全长 301km，平均每隔 12min 就会发出一辆运营列车，最高运营速度为 300-350km/h。面对如此高的列车运行时速的和频繁的发车客次，长期的轮轨激励的作用势必会削弱路基结构的服役状态，而以往的认识，路基结构沉降变形所造成的轨道平顺性下降，是导致 TQI 超限的最重要原因^[1]。

1.2 工程地质的构成与特征

在工程地质概况上，其一般坡度为 12‰，局部地段则不大超过 20‰，其中有 24 处需要跨越高等级公路，存在线路复杂的问题。但是沪宁城际铁路整个区域地质条件相对稳定，没有发生过火山、地震、断层、泥石流、滑坡等严重的自然灾害，并主要以断裂、裂隙二种形迹表现，节理裂隙与断裂紧密相关^[2]。整体而言，沪宁城际铁路整片区域地势较为平缓，但是地质结构较为复杂。

此外，本文根据资料和试验成果，结合《江苏省城市轨道交通岩土工程勘察标准》(DGJ32/TJ208-2016)，以及 2021 年同济大学出版的《上海市域铁路岩土工程勘察规范》^[3]，可将沪宁城际铁路的勘探深度范围内地基土划分为工程地质层以及工程地质亚层，并根据勘察数据将每层作为一个统计单元，得出以下修正系数 γ_s ：

$$\gamma_s = 1 \pm (1.704n - 0.5 + 4.678n - 2)\delta$$

式中统计试样个数为 n ，变异系数为 δ ，按上述方法统计方法由此确定本文地基基础设计参数。经计

算，得出沪宁城际铁路人工填土的极限承载力为 440.35kPa；种植植物的粉质黏土极限承载力为 601.32kPa；粉质黏土夹淤泥极限承载力为 473.57kPa；粘性较强的粉质黏土极限承载力为 784.54kPa；灰色黏土极限承载力为 440.35kPa。

1.3 轨道平顺状态动态检测

为了可以基于 TQI，从 7 个分项指标上对沪宁城际铁路进行整体的不平顺评测，本文坚持平均每月对其检测 2 次并记录相关数据，再参照《中国铁路上海局集团有限公司普速铁路线路维修实施细则》的相关管理规范^[4]，设沪宁城际铁路 TQI 的限值为 5mm，得出了如表 1 所示的不平顺 200m 单元区段检测参数。

2 TQI 超限与路基沉降关联性分析

2.1 路基沉降测量点布置

沉降变形测量点包括三种，其中包括基准点，工作基准点和沉降变形观测点三种，其位置设置需满足：

(1) 基准点：将沪宁城际铁路需要观测的位置设在沉降变形区以外较为稳定的区域中，在测量过程中稳定不变的地放埋设，而在设置基准点时，其数量上需在 3 个以上，以便更加及时的保证它的稳定性。

(2) 工作基点：工作基点同样要保持绝对稳定的地方，在整个测量过程中具有传递高程信息的作用。根据国家规定必要时要加密水准基点，加密后，当水准基准点之间的距离约为 200m 时，要保证实际工程中符合垂直位移监测的相关要求。

(3) 沉降变形点：将需要测定的变形体，设置为能够表现出沉降变形体的特征。要求在安装时达到牢靠结实方便测量员观察，同时保持美观好看，设置合理，不要埋设在稳定性差的地方。沉降变形点是根据路堤，桥梁和涵洞以及隧道等专业布局点的要求进行的。

2.2 路基沉降的观察检测

(1) 观测断面的布置

在需要观测的地方段由于各方面引起的地质结构的不相同，在布置每一个观测断面的间距大小也不相同。路基观测断面间距应小于等于 50m，在需要观测的路段在高度上不高于 5 米，路势比较平坦、比较稳定的情况下，在布置断面的距离在 100

米左右。在一些地形坡度变化较大以及地质条件变化较大的地方可以考虑布设小于等于 25m 的断面进行加密处理。每一段路基沉降观测区域内不应该低于两个观测断面。

(2) 观测点的布设

①在一般路堤的地方的每个观测断面需要设置沉降观测桩 3 个，沉降板 1 个沉降观测桩的位置一般可以安置在路基的中心的位置和两侧的中心线两旁大概 2 米的位置，而沉降板它的位置可以设置在路基中心的地方。

②在软土路堤的地方的每个观测断面需要设置沉降观测桩 3 个，沉降板 1 个。沉降观测桩的位置一般可以安置在路基的中心的位置和两侧的中心线两旁大概 2 米的位置，而沉降板它的位置可以设置在路基中心的地方。本研究，则设置在路基两侧坡角 2m 和 10m 处。

③在路堑的地方需要在每个观测断面上设置 3 个沉降观测桩，其位置设置在路基的中心的位置，以及左右两边路基面上距离两侧中心线大概 2 米以外的位置。

(3) 观测元件的埋设

沉降板是一种更简单，更实用，更安全可靠经常被使用的方法。在用于路基面的沉降观测的时候，利用沉降管的方法以及利用位移计的方法都没有利用沉降板观测的优势更加明显。

沉降板是通过三部分组合而成的。分别包括了

尺寸大小为 50cm×50cm×3cm 的钢筋混凝土材料制成的底板、半径大小为 20 毫米的金属材质制成的测杆、质地为塑料的保护套管。其中保护套管尺寸大小需要依照测杆半径的大小制作，能够更好、更稳固的让保护套嵌入在测杆上。

沉降板通常设置在路线中心，根据观测内容，将沉降板埋入在路基的基地部分。沉降板在埋设的时候需要保证测杆和地面的角度保持在 90°，沉降板在埋入路基的位置如图 1。

沉降观测桩，本研究安放在了基础绝对稳定的两边的路基面上，以及沪宁城际铁路挡土墙等稳定性强的结构物上。根据测量的精度以及频率等的相关的要求，定期观察路肩设置的观测桩的顶部的测量点的高度，而观测方法则可以采用水准测量，最终绘制出沉降观测桩在路基面两边的埋设位置，如图 2 所示。

2.3 TQI 单项指标超限相关性分析

目前在学术研究及实际应用中，在铁路现场多是采用 TQI 总值>5、<5 或值是否偏大等方式评定、判断是否需要维修。本文提出的新预测模型，旨在通过某些相关性强的分项指标的数值区间，由此来判断路段是否需要维修和养护，因此本研究特从 7 个分项指标对沪宁城际铁路进行深入研究，论述路基沉降与 TQI 各单项指标之间的关系。最终，本文基于斯皮尔曼等级相关系数检验，得出了如表 2 所示结果。

表 1 沪宁城际铁路 TQI 管理值

项目	左高低	右高低	左轨向	右轨向	水平	三角坑	轨距	TQI
限值	0.8	0.8	0.7	0.7	0.7	0.7	0.6	5.0

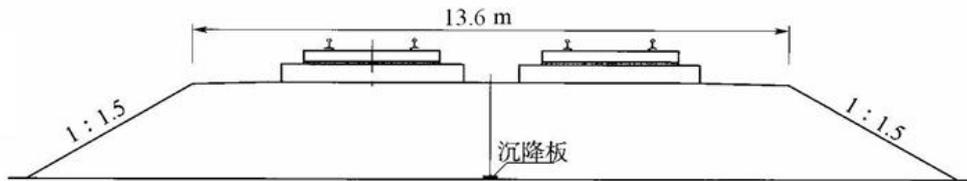


图 1 沉降板埋设的位置示意图

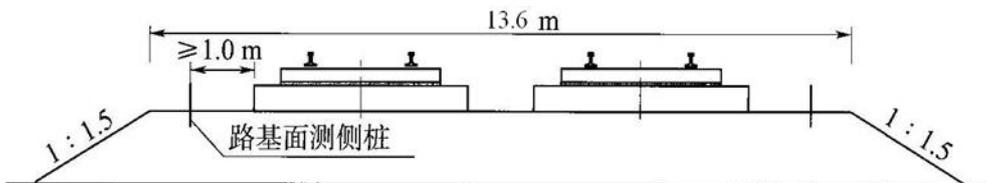


图 2 观测桩埋设的位置示意图

表 2 TQI 与路基沉降关联性分析

项目	左高低	右高低	左轨向	右轨向	水平	三角坑	轨距
相关系数	0.396	0.352	0.029	0.052	0.291	0.210	-0.093
P	0.000	0.000	>0.05	>0.05	<0.05	>0.05	>0.05

由此,本文得出了沪宁城际铁路 TQI 与路基沉降的相关性,主要体现在左高低、右高低,以及水平三个指标上存在显著相关 ($p < 0.05$),而在左轨向、右轨向、三角坑,以及轨距等指标上,则与路基沉降无显著关联 ($p > 0.05$)。由此基于以上研究结果,再次验证了本文的假设,也即相关部分在对铁路路基的养护过程中,仅凭借 TQI 作为衡量软基高铁各路段是否需要养护的参考指标,将存在较大的缺陷。

究其原因,是因为路基结构发生沉降,进而在列车动荷载和路基上部结构荷载等因素的共同作用下,使深处地基土固结沉降产生的新的压缩变形,所以造成了路基沉降变形在空间上大多是竖直方向的改变,使用 TQI 这样的多方向的综合指标反映路基的结构状态不够精准。

因此本文建议,选择轨道不平顺类别中的垂向不平顺指标与路基沉降量进行相关性分析,拟合出各单项指标参数与路基沉降之间的关系曲线,后期可通过输入较高频次获得的轨检车动态监测数据预测高速铁路路基的变形趋势。此外,相对于路基结构的绝对沉降量,在后续的研究中更应关注沉降变形的未来趋势能否通过 TQI 分项指标判定出来,较早期发现沉降变形增大趋势的隐患点,才能明确剥离部分区域的“假平顺性”现象^[5]。工程中可通过使用轨检车监测数据预测路基变形量大的位点,既能减轻因全线路基检测繁杂而导致耗时长的问题,又能对线路中有安全风险的路基结构区域进行提前预警和养护维修。

3 结论

综上所述,本文以沪宁城际铁路为例,基于 TQI 与路基沉降关联性分析,对路基服役状态以及相关养护评估的可行性与参考价值展开了论述,得出了 TQI 单项指标和路基变形进行关联性分析,是用于搭接“高测试精度但低测试频度”的轨道沉降量与“高测试频度但低测试精度”的轨道平顺性指标之

间的桥梁,以此可以提高对高速铁路路基沉降预测的有效性,及铁路现场对于路基状态精确判断提供理论支撑,具有一定的工程实用价值。

然而本文也存在一定的局限性,未能通过搭建相关模型对 TQI 与路基沉降关联性展开进一步的探讨,希望在后续的研究中,本文可以弥补高频次测试但低精度的 TQI 与低频次检测但高精度的路基沉降之间的缺点,通过搭建相关预测模型,将高频次 TQI 数据输入进去,预测路基沉降,进行危险路段的预判和预警,从而为我国铁路线路规划设计以及轨道结构创新带来更多的参考。

参考文献

- [1] 方诗诺,肖雅秋,白尧,等.基于 TQI 与沉降值拟合法预测有轨电车路基检修间隔[J].轨道交通装备与技术,2023(1):4.
- [2] 戴天毅.路堤刚性桩复合地基稳定性分析与沉降计算方法研究[D].西南交通大学,2021.
- [3] 陈舒阳,路良恺,姚永胜.基于 TQI 与沉降关联性分析的高铁路基服役状态监测[J].土木与环境工程学报(中英文),2020,42(6):8.
- [4] 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):5.
- [5] 崔旭浩,杨怀志,杜博文,等.路基不均匀沉降对 CRTS II 型板式无砟轨道损伤和变形影响分析[J].铁道学报,2021,043(10): 91-97.

版权声明: ©2023 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

