区域不均匀沉降对 CRTSIII 无砟轨道的影响分析

周传水

中铁十四局集团第四工程有限公司　山东　济南　250004

摘　要：高速铁路无砟轨道对地基变形十分敏感，不均匀沉降会直接影响轨道的正常服役状态。本文针对高铁 CRTSIII 无砟轨道开展研究，分析区域不均匀沉降的成因与分类，探讨沉降问题对轨道变形状态和力学性能的具体影响。地基不均匀沉降会改变轨道原有受力条件，造成轨道变形、构件损坏与轨面平顺性下降，直接影响列车运行的稳定性。研究结合轨道病害的发展规律，总结对应的防控与养护措施，能够为高铁无砟轨道的日常运维和病害治理提供一定的技术参考。

关键词：区域不均匀沉降；CRTSIII 无砟轨道；结构变形；力学响应；病害防控

引言：高速铁路无砟轨道对基础变形控制标准较为严格，基础出现的沉降变形会直接影响高铁线路的长期运营稳定性。CRTSIII 无砟轨道目前在国内高速铁路工程中使用范围较广，复杂地质条件产生的区域不均匀沉降，会持续干扰轨道结构的整体状态，缩短轨道整体服役年限。本文依托该型轨道的结构特征，分析区域不均匀沉降的病害发展规律与作用机理，整理对应的养护和防控措施，能够为国内高铁无砟轨道的运维工作和病害治理工作提供可靠的研究参考。

工程概况

本文依托津潍高铁潍坊寿光段工程项目开展研究。津潍高铁是国家“八纵八横”高速铁路网京沪辅助通道重要组成部分，起自天津枢纽滨海站，终至潍坊北站，正线全长约 348 公里，设计时速 350 公里，是连接京津冀、山东半岛两大城市群的核心快速客运通道；其中潍坊寿光段线路总长约 42.7 公里，以路基、桥梁工程为主，桥隧占比 87.2%，全线采用 CRTSIII 型板式无砟轨道结构，是我国北方寒冷地区典型高铁建设示范段。

寿光段地处鲁北冲积平原，场地地层以第四系粉质黏土、粉土及砂土为主，表层 3~10m 普遍分布软弱土层，地下水埋藏浅，部分区域盐渍化，冬季冻胀与地下水渗流影响显著，属于区域不均匀沉降风险高发路段。项目建设阶段采用水泥搅拌桩、CFG 桩复合地基加固软弱地基，运营期持续开展轨道状态检测与病害整治，相关工程实践数据可为验证沉降防控措施有效性提供支撑。

1 CRTSIII 无砟轨道结构特性与区域不均匀沉降概述

CRTSIII 型无砟轨道为分层刚性单元板式结构，由多种轨道构件组成，整体稳定性有保障，整体刚度较高，自身变形适配能力有限，各结构层贴合紧密，正常运营受力稳定，仅能适配小幅基础形变；路基、桥梁基础大范围不均匀沉降会使轨道产生弯曲、拉伸等被动变形，引发应力集中与层间脱空问题[1]。区域不均匀沉降是由地质、水文、施工质量、外部荷载等多重因素诱发的线路大范围持续性基础变形，按空间形态可分为三类，不同沉降形式对轨道结构的形变和力学破坏效果存在差异。

2 区域不均匀沉降对 CRTSIII 无砟轨道的具体影响分析

2.1 对轨道结构整体变形的影响

区域不均匀沉降是造成 CRTSIII 无砟轨道产生整体强制变形的主要原因，它会改变轨道原本的平整状态。无砟轨道直接铺设在下部基础上方，基础出现的区域性差异变形会直接传递到上部轨道结构，使得轨道产生竖向起伏、纵向倾斜以及横向翘曲等变形现象，这类变形一般具备全域性和连续性的特征。不同形式的区域沉降对轨道产生的变形作用存在一定差异，连续平缓的沉降会让轨道整体出现弯曲变形，轨道变形量会随着基础沉降量同步增加，沉降持续发展会逐步形成长波长轨道病害，对列车平稳运行造成不利影响。突变式的阶梯沉降会让轨道结构产生折角与端部错台问题，轨道平顺状态会快速恶化，会对线路行车安全造成威胁。凹槽型沉降可以使轨道中部位置下沉、两端位置上翘，结构层之间的贴合状态会受到破坏。轨道变形会在长期运营过程中不断累积，这类变形不具备自行恢复的能力，永久变形的持续叠加会逐步降低高速铁路线路的整体运营品质。

2.2 对轨道结构力学性能的影响

CRTSIII 无砟轨道的受力平衡状态会被区域不均匀沉降打破，轨道整体力学性能会出现持续衰减。轨道在常规运营条件下仅承受自身重力与列车荷载，结构内部应力分布相对均匀，各构件受力状态基本符合设计标准，整体结构可以保持稳定工作。地基出现不均匀沉降变形后，轨道结构会随之产生弯曲、拉伸与压缩形变，结构内部会产生附加内力和弯矩，原有应力分布模式会发生改变，进而出现大范围的应力集中现象。轨道板、自密实充填层以及底座板作为主要受力构件，受沉降影响的程度相对更高，各类构件会出现不同程度的性能劣化，结构整体抗裂能力与承载性能会逐步降低[2]。不同形态的不均匀沉降带来的破坏效果存在差异，各类沉降问题都会持续积累结构损伤，让轨道刚度参数不断下降，疲劳损伤问题持续加重。长期的沉降作用会持续削弱轨道结构的受力稳定性，对无砟轨道的长期服役安全造成不利影响。

2.3 对轨道部件服役状态的影响

区域不均匀沉降带来的结构形变和应力重新分布，会对 CRTSIII 无砟轨道各类核心构件造成损伤，构件的正常使用年限会随之缩减，轨道结构也会产生多种结构性病害。这类病害主要包含四种常见类型，分别是结构层脱空、混凝土开裂、限位构件失效以及扣件系统损坏。轨道各结构层的贴合效果依靠自密实充填层维持，不均匀沉降会让轨道整体变形不协调，结构层之间会出现分离脱空的现象，轨道支撑条件会因此变差，列车荷载作用会持续扩大脱空范围，破坏轨道整体传力体系。结构长期承受附加应力会让轨道板、底座板和充填层产生开裂问题，不同位置的结构裂缝形态存在差异，外界环境介质会通过裂缝侵入结构内部，加速构件老化损坏。沉降引发的轨道形变会持续挤压剪切限位凹槽结构，凹槽的限位约束能力会逐步衰减，严重时会造成轨道板位移偏移，降低整体结构稳定性。同时，不规则的轨面形态会改变钢轨受力状态，轨道扣件会承受多余的外力作用，进而出现松动、变形和破损等问题，钢轨的固定效果会受到影响，轨面平顺性与列车运行稳定性也会持续下降。

2.4 对列车行车动力响应与运营安全的影响

CRTSIII 无砟轨道可为高速列车提供平稳运行条件，区域不均匀沉降造成的轨面变形、刚度不均、构件损伤，会作用于车轨耦合体系，改变列车动力运行状态，影响线路运行安全与乘车体验。大范围不均匀形变会改变轮轨基础接触状态，造成轮轨作用力不稳定波动，提升列车竖向、横向振动幅度[3]。沉降数值与沉降梯度变化会影响轮轨冲击强度，导致列车动力指标超标。连续性沉降变形会引发列车低频振动，造成车体持续晃动；沉降突变会造成轨面错台与折角，引发高频冲击振动，提升轮轨共振概率，降低列车运行整体稳定性。长期运营中，沉降诱发的轨道病害与车轨振动会形成相互影响的循环，持续加重轨道损伤。超标沉降变形会迫使列车降速，制约线路通行效率，严重轨道病害还会带来安全隐患。持续剧烈振动会加速列车配件疲劳损耗，增加设备维护成本，缩减列车设备使用年限。

3 区域不均匀沉降下 CRTSIII 无砟轨道病害防控与养护措施

3.1 前期地质预处理与施工质量管控

区域不均匀沉降防控需从源头开展治理，地质勘察与路基施工管控是降低线路沉降病害概率的核心手段。工程设计阶段，需细化区域地质勘察，明确不良地质分布，针对地质薄弱路段制定地基加固方案，提升地基承载力与结构稳定性，缩小地层沉降差异；针对路桥、路隧过渡段等沉降高发位置，优化基础结构设计，增设过渡缓冲结构，弱化不同基础间的刚度差，避免阶梯型不均匀沉降。施工阶段需落实质量管控，严格遵循路基填筑标准化作业要求，选用合格填料，控制分层填筑厚度与压实程度，避免路基质量问题；完善路基排水体系，做好排水管控，避免水体入渗软化路基，抑制沉降发展。工程全过程需落实质量检测，逐段检测路基性能，及时整改不达标路段，从根源减少区域不均匀沉降带来的线路运营隐患。

3.2 建立全域沉降动态监测体系

工作人员需要结合区域不均匀沉降的发育特点，搭建覆盖全线的动态监测体系，这套监测机制可以常态化记录沉降变化情况，能够对轨道沉降病害做到及时发现、预警与处理。工作人员需要结合线路实际的地质情况布置监测点位，监测点位的布置密度需要根据路段风险情况做出调整，地质条件较差的路段、结构过渡路段以及沉降高发路段都需要增加监测点位数量，以此保障整条线路的监测工作不存在监测盲区[4]。工程人员可以利用自动化监测设备和轨面状态监测系统，持续收集基础沉降量、沉降变化速度、轨面变形情况以及结构应力等相关数据，工作人员可以依托这些数据建立动态更新的沉降信息数据库。相关单位需要制定固定的监测工作制度，日常阶段需要保持常规监测频次，在雨季、汛期以及周边存在施工活动的阶段，工作人员需要适当增

加监测次数，持续掌握区域沉降的变化规律。工作人员可以依托现有数据搭建沉降预警模型，按照沉降变化的相关指标设置多级预警标准，一旦监测数据超出规定范围，系统就可以及时发出预警信息，工作人员能够据此判断沉降发展趋势和病害发生风险，为轨道养护和修复工作提供数据依据，同时工作人员也需要定期整理监测数据，总结沉降分布与变化规律，持续优化线路运维管理方案，有效抑制沉降病害持续发展。

3.3 轨道结构常态化养护维护

铁路运维单位需要依托常态化的沉降监测数据，开展持续性的轨道养护作业，相关工作可以及时处理轻微的轨道病害，能够有效避免病害问题持续累积和恶化。工作人员需要落实定期排查制度，对轨道板、自密实充填层以及底座板的破损、开裂、脱空等常见病害进行系统检查，养护人员可以对结构表层的细微裂缝进行修补，同时利用低压注浆工艺处理小型层间脱空区域，让轨道各结构层可以紧密贴合，恢复轨道正常的传力能力。工作人员需要定期检查轨道扣件系统，对出现松动的扣件进行紧固处理，及时更换已经损坏的弹条与螺栓部件，保证钢轨的约束状态保持稳定，维持轨面的基础平顺性。对于小幅沉降所引发的轨面不平整问题，养护人员可以应用轨道精调工艺，通过扣件参数调整和轨面打磨的方式，修正轨道存在的形变偏差，让轨道平顺指标可以满足列车通行要求。工作人员也要重视限位凹槽的养护工作，及时修补凹槽位置脱落和破损的混凝土结构，恢复结构原本的限位约束能力，避免轨道板出现位移和翘曲的情况。运维部门需要建立标准化的养护台账，对沉降监测数据、病害具体位置、养护处理方式以及修复成果进行统一记录，搭建完整的闭环养护管理体系，以此长期维持 CRTSIII 无砟轨道的整体服役性能，保障高铁线路可以保持稳定的运行状态。

3.4 病害专项修复与结构加固技术

中大幅度的区域不均匀沉降会引发较为严重的轨道病害，常规养护手段无法彻底修复结构损伤，这就需要行业采用专项修复与结构加固技术，保障轨道结构可以正常投入使用。高压注浆加固技术是现阶段常用的处置方式，该技术主要用于沉降幅度大、结构层存在大范围脱空的路段，施工人员会通过注浆作业填充路基软弱土层与轨道脱空区域，让松散土体实现固结压实，以此提升地基整体稳定性，恢复轨道结构的传力功能[5]。在轨道混凝土出现大面积开裂、整体结构刚度下降的情况下，工作人员可采用高性能修补材料处理破损部位，同时对核心受力区域做加固处理，提升混凝土结构的抗弯与抗拉性能，恢复轨道原有力学指标。轨道抬升调平技术能够改善阶梯沉降造成的轨面错台问题，工作人员可精准调整轨道竖向高程与平面位置，消除轨面折角与错台缺陷，恢复轨面基本平顺状态。针对沉降持续发展、地基稳定性极差的特殊路段，工作人员需要对路基进行二次加固，必要时可开展基础重构施工，从源头控制沉降问题。所有修复作业完成后，相关人员需要落实质量验收工作，长期监测修复区段的结构变形与受力情况，防止病害二次复发，保障无砟轨道长期稳定服役。

结束语

综上所述，无砟轨道的整体服役状态会受到区域不均匀沉降的多维度影响，这类基础变形问题也是高速铁路日常运维工作中需要重点管控的病害隐患。前期地基治理、实时沉降监测、日常养护作业以及针对性结构加固等手段，能够有效控制沉降病害的发展速度，减少轨道结构的损伤积累。梳理了沉降对轨道的作用规律与对应防控办法，可在一定程度上完善无砟轨道沉降病害的治理体系，为高铁线路运维保障与病害防控工作提供基础的技术支撑。

参考文献

[1] 陈利, 余翠英, 龚凯, 等. 双块式无砟轨道路基不均匀沉降静力损伤影响及评级 [J]. 华东交通大学学报,2024,41(6):11-18.

[2] 李国芳, 李宏洲, 马理超, 等. 路基横向不均匀沉降变形对车-轨动力响应的影响规律研究 [J]. 振动工程学报,2026,39(3):847-858.

[3] 项阳, 杨怀志, 于连山, 等. 温度荷载下充填层性能对 CRTS III 型板式轨道塑性损伤的影响 [J]. 铁道科学与工程学报,2025,22(2):590-601.

[4] 陈泽林, 蔡小培, 赵磊, 等. 限位凹槽纵向间距对 CRTSIII 型板式无砟轨道受力及轨面平顺性的影响分析 [J]. 中南大学学报（自然科学版）,2024,55(12):4560-4569.

[5] 杨书生, 王宏阁, 宿宝忠, 等. 路基冻胀-融化-沉降组合作用下 CRTSIII 型板式无砟轨道的变形损伤 [J]. 铁道建筑,2024,64(7):121-127.