

浅析高速铁路桥梁沉降变形机理及防控技术

白永胜

东南沿海铁路福建有限责任公司

摘要：高铁作为常用的交通出行方式，具有高安全性和高舒适度的技术优势，高铁桥梁要求桥梁、路基等结构必须保持高平顺度，其关键在于控制桥梁路基工程的沉降变形稳定。本文通过工程实例分析了高铁桥梁沉降变形特征，探讨了路基沉降对高铁桥梁的影响，针对沉降变形的影响因素，提出了高铁桥梁沉降防控技术，通过在桩基施工、支座选型及安装过程中进行优化安装工艺和加强质量管控，有效减少工后沉降变形，实现了高铁桥梁沉降的稳定控制。

关键词：高速铁路桥梁；沉降变形；桩基施工；支座选型

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2022.23.047

引言

高铁在我国作为人们最常用的交通出行方式，具有高安全性和高舒适度的技术优势，高铁桥梁要求桥梁、路基等结构必须保持高平顺度，其关键在于控制桥梁路基工程的沉降变形稳定。大量工程案例证明，高速铁路桥梁基础的沉降是影响列车高速运营和轨道平顺安全性的关键因素。针对施工期与工后桥梁路基沉降带来的问题，国内外学者进行了大量研究。张华^[1]利用桥墩沉降监测数据，分别讨论了桥墩均匀沉降与相邻桥墩差异沉降两种沉降情况对轨道平顺性的影响，最终指出差异性沉降是引起轨道产生不平顺变化的主要原因。石瑞喜^[2]通过分析沉降区桥墩监测数据，总结出桥墩沉降的发展规律，探讨了差异性沉降对轨道线路平顺性的影响，结论指出相邻桥墩间的差异沉降增加会导致轨面不平顺波长变长；轨面高程差异沉降速率大于桥墩差异沉降速率。陈兆玮^[3-5]在研究中推导了桥墩沉降和钢轨变形的相关关系，并通过桥墩沉降模型分析了桥墩沉降对高速铁路系统的影响规律，指出桥墩沉降发展会加速轨道变形，且桥梁跨度越大，由桥墩沉降带来的影响越小。

一、工程概况

新建某铁路工程全线长度为358.8km，其中，河南省境内33.4km，山西省境内325.4km。太原至焦作铁路（山西段）全线桥梁共计103座，长度95.9km，占比29.5%；隧道共计35.5座，占比44.6%；路基长84.3km，占比25.9%。正线铺轨共计637.1km，其中有砟轨道341.4km，无砟轨道295.7km，无砟轨道占比46.4%。太焦铁路TJZQ-3标施工里程为DK65+340.35~DK81+407.5，线路长度16.07km。标段结构物有白北隧道、榆社隧道、白北村乌马河大桥、桥隧过渡段路基3段。其中，标段内白北村乌马河大桥设计为双线无砟轨道桥，设计时速250km/h，线路间距4.6m。桥跨结构：9~32m简支梁+2~24m简支梁+1~（32+48+32）m连续梁。桥梁桩基采用群桩受力结

构，承载方式为柱桩、摩擦桩。

二、高铁桥梁沉降变形的特征及影响因素

（一）沉降影响的深度大

经过对地面区域沉降问题的调查研究，造成地面区域沉降问题的主要原因是地下水的过度开采。如在华北平原地区范围内，由于地下水过度开采，使得地面区域沉降问题越来越严重。在实际工况中，除我国北京地区地下水开采引起的地面区域沉降影响深度比较浅以外，在我国河北沧州地区、天津地区、山东德州地区由于地下水开采而造成的地面区域沉降影响深度非常深，平均在200~400m。在有些地区地面区域沉降的影响深度已经达到了500m以上，甚至在很多沿海地区在地下水的过度开采和地面区域沉降的双重影响下还出现了海水倒灌的现象。

（二）沉降发展的阶段性和不均匀性

首先，地面区域沉降问题的形成阶段。此阶段，地面已经开始出现不同程度的沉降，但是其沉降发展较为缓慢，地面区域沉降量也很小，影响波及范围也非常有限，属于地面区域沉降问题的初级阶段。其次，地面区域沉降问题的发展阶段。地面区域沉降开始出现快速的发展，地面区域沉降发展最为迅速的区域逐渐形成了以漏斗状为中心的沉降区域，并且这个阶段的地面区域沉降不均匀性表现最为突出，同时地面区域沉降所影响波及的范围也变得越来越大。最后，地面区域沉降的快速扩展阶段。地面区域沉降的速度逐渐变缓，但是其沉降影响波及的区域却越来越大，并且在影响波及范围的不断扩大中，还出现了新的地面区域沉降中心。地面区域沉降问题最为复杂，同时治理难度极大。因此，在实际工况中，一旦发现地面区域沉降问题的发展正处于中期发展阶段或者早期发展阶段，应立即采取有效手段对地面区域沉降进行治理，尽可能稳定其进一步的发展并减小其影响波及的范围。

（三）沉降问题分布范围广

按照地面区域沉降问题调查机构的调查监测数据显示，华北平原地区大部分区域存在地面区域沉降，并且在华北平原上不同的地区，沉降问题的影响依然在扩大，这对于高速铁路桥梁工程将会造成严重的影响。除此之外，很多地面区域沉降问题不但影响波及范围广，而且多发生在农村地区或者地理位置偏僻地区，由于交通不便，使得建设区域的地面区域沉降问题很难得到有效的控制和治理，直接导致桥梁工程建设区域的地面区域沉降问题影响范围越来越大。

三、路基沉降对高铁桥梁的影响

（一）地面区域沉降对桥梁工程建设测量方面的影响

在高铁桥梁工程进行建设之前，对施工区域进行科

学严谨的环境测量,获取精准的测量数据,以此保证整体高速铁路桥梁工程的后期施工建设。在此期间,当施工区域发生地面区域沉降问题时,会导致在前期测量工作中出现测量数据出现失真,导致监测误差的出现。尤其是对地面水平角度以及坡度测量时,地面区域沉降问题会严重影响测量数据的精度,进而影响整体施工方案的制定,对后期的工程建设带来极大的施工安全隐患。

(二) 地面区域沉降对桥梁工程地基建的影响

在高速铁路桥梁工程的施工过程中,桥墩地基施工是核心的技术难题,其保证了桥梁工程的整体稳定性与安全性^[6]。当高速铁路桥梁工程建设区域出现地面区域沉降问题,会直接造成工程建设地基出现变形形成坡度差,甚至当地面区域沉降问题严重时会导致桥梁工程地基出现塌陷和断裂,严重影响导桥梁工程建设的安全稳定施工。除此之外,地面区域沉降问题会严重影响建设环境的地质稳定性,导致地表水位发生变化,会给后期高速铁路桥梁工程的通航能力造成严重的影响。

(三) 地面区域沉降问题对高速铁路舒适度的影响

高速铁路建设目的在于为人们提供更安全舒适的出行,在国家不断提升高速铁路舒适度的要求下,地面出现不均匀的沉降会导致桥梁轨道出现不同程度的起伏,这严重影响了高速铁路的安全和舒适度^[7]。除此之外,当地面出现不同程度的沉降后,势必会影响整体高速列车的通行速度,在很大程度上严重影响了人们的快速安全通行的需求。

四、高铁桥梁施工期间沉降变形的主要影响因素

(一) 支座安装

支座安装偏差大会导致支座受力分布发生改变,产生变形、损坏,直接影响支座传递上部荷载的效果,加剧桥梁整体变形,影响最终控制成果。

(二) 桩基施工

(1) 成桩的完整性,对桩基整体受力影响较大。桩基穿越卵石层时,传统的泥浆护壁不能有效保持桩孔稳定,易出现塌孔、缩颈、断桩等质量病害。桩身完整性不达标,造成桩基实际承载力下降。

(2) 桩基摩擦力下降,达不到设计承载力。桩基成孔过程中,采用泥浆护壁措施,桩体周围易产生较厚的泥皮,降低桩基与周围地基间的摩擦力。钻进过程中,实际地质与设计地质是否相符也是影响桩基承载力的因素^[8]。

(3) 桩基底部沉降厚度大,桩基不能落到坚实的地基上。桩基成孔后,仅靠旋挖钻斗并不能将桩孔内的钻渣清理干净。桩孔底部虚渣过厚,会在桩基受力后影响桩基的有效承载力,造成桥梁整体或局部不均匀沉降。

五、高铁桥梁沉降防控技术

(一) 桩基施工技术的应用

(1) 卵石地层段桩基施工时,采用长护筒穿越不良地质,有效避免卵石层塌孔、缩颈、断桩等质量病害。施工技术要点如下:①采用10~12mm壁厚钢管作为护筒,最下面一节钢护筒设置刃脚,减小下放护筒的阻力。靠护筒自重无法下沉时,使用振动锤加载,如遇阻

力无法下沉时,需要查明原因再继续加载,不能强行加载,防止护筒下边缘弯折、卷边、损坏,致使后期护筒拔出过程中泥土进入桩体,造成桩体夹泥。②待混凝土浇筑完成后,采用振锤将护筒拔出,拔出应匀速进行,避免过快引起混凝土密实度下降,影响桩体质量。

(2) 施工过程中,应认真核对各个深度的地质情况,若发现地质情况与设计不符,应及时和设计单位沟通,检算桩基承载力是否达标,判断是否需要增加桩长加大有效承载力^[9]。桩基施工过程中,为保证桩孔稳定,应采用泥浆护壁的方法。为减小桩孔周围泥壁对桩基承载力的影响,应采取以下措施:①选用成孔速度快的旋挖钻机成孔,加快成孔速度。成孔后及时浇筑混凝土,减少泥浆护壁时间。②严格控制泥浆比重,选用膨润土配制高性能泥浆,钻机成孔过程中,根据地质情况适时调整泥浆指标,将泥浆比重控制在0.9~1.2,黏度控制在16~22s。

(3) 桩基成孔后,及时测量桩孔深度,确定桩长,判断沉渣厚度。为有效控制沉渣厚度,应采用以下施工技术:①加快沉渣清理,降低泥浆含砂率。钻孔完成后,提高钻头至距孔底10~20cm的位置,并保持慢速空转的状态,循环清孔时间要高于30min。利用钻头翻动泥浆,利用大功率泥浆泵及时补浆,提高泥浆更换率,将浮渣带出桩孔。②钢筋笼的节段长度应合理,减少接头,采用速度较快的机械连接方式缩短泥浆再次沉淀的时间,减小沉渣厚度^[10]。③利用混凝土导管进行二次清孔。通过空压机的导管向孔内压入空气,翻动泥浆,进行二次清孔。沉渣清理合格后,及时浇筑混凝土,避免孔底再次沉淀沉渣,严格控制泥浆的含砂率,将含砂率控制在2%以下,柱桩沉渣厚度控制在3cm以下,摩擦桩沉渣厚度控制在5cm以下。④混凝土浇筑时,应严格控制首批封底混凝土数量,确保混凝土下落时具有一定的冲击能,使泥浆从导管内顺利排出,并将导管下口埋入混凝土中,由此起到控制桩底沉渣、减少工后沉降的作用^[11]。混凝土浇筑过程中,应加快泥浆的循环速率,及时带走孔内浮渣,减小桩基浇筑阻力,在保证钢筋笼稳定的情况下,加快混凝土浇筑速度。

(二) 支座选型与安装施工技术的应用

(1) 支座的合理选型

通过查询相关资料得知,桥梁出现变形后的常规做法是更换支座进行调整。支座更换的施工难度大、成本高、耗时长,每次更换都需要进行大量的施工准备和协调工作,尤其是在高速铁路运营期间,对铁路的运营安全产生较大影响。桥梁设计时采用ZK活载,通过对比研究决定选用大调高量球型支座,预留调高量0~60mm。该支座在设计制造过程中,考虑了后期调高后支座的受力稳定性,可满足多次调高工况,可通过在支座钢板处增加调高钢板的方式进行调高,最大程度地保持支座原结构体系,施工较简便。调高支座可解决施工过程中以下工况的桥梁变形:①桥梁工后沉降变形,轨面标高低于设计值,沉降量在0~60mm之间,均可通过此支座进行调高消除^[12]。调高方式采用在支座钢板与梁体之间添加钢板的方式,实现多次调高。多次调高时,钢板必

须更换成一块钢板调高,禁止多块钢板叠加调高。②桥梁施工、运营过程中,若支座接触面受力不均匀,会造成支座变形,引起上下支座钢板不平行,且上支座面不水平,不满足设计工况。通过定制楔形钢板进行支座调平校正,达到设计工况。若发现支座由于纵、横向位移超限,引起支座结构损坏,只能通过更换支座的方式消除隐患。支座调高施工注意事项:①支座调高量,需先测量梁体标高,通过计算确定调高值。连续梁的调高量和超顶量,应根据梁体设计检算确定,避免因超顶造成梁体开裂。②根据梁体支座的设计荷载确定千斤顶的最大顶升力。③顶升前,应根据设计文件要求,放松相邻区段的轨道扣压力,拆除支座与梁体连接螺栓。④顶升时,同一墩台上的支座应同步顶升,做好竖向位移监控。顶升至超过设计标高2~3mm后,锁定千斤顶,安装临时支撑。临时支撑一般选用易拆除的沙箱。在梁体与支座缝隙间安装定制钢板,并安装好连接螺栓,不拧紧^[13]。⑤落梁顺序需满足设计文件要求,缓慢回落千斤顶,待支座受压,梁体就位后,拧紧连接螺栓,拆除千斤顶和临时支撑。⑥调整轨道扣件扣压力至设计值,检查轨道状态。

(2) 优化支座安装工艺

支座安装施工技术控制点:①针对凿毛支座就位面,应清除预留锚栓孔内杂物,浸湿接触面,安装灌浆用钢模板,采用膨胀螺栓固定,并在底部加设4mm厚橡胶条,防止漏浆。②支座安装需使用水准尺、水准仪等工具精确调平支座四周,保证支座轴心受力状态。支座调整就位后,需与垫石间预留20~30mm缝隙,用于灌浆施工。③采用重力式灌浆法进行支座灌浆,采用M50流动性无收缩砂浆,通过导管从支座中心处开始灌注^[14]。待砂浆终凝有一定强度后,拆除钢模板。④支座安装完成,且梁体混凝土浇筑完成后,方可拆除支座上下钢板连接螺栓。

(三) 桥梁工程适应性技术措施

目前,市场中的桥梁地基可调节支座所设计的坡度最大可以达到25%左右,通过科学采用可调节支座,可以有效应对地面区域沉降对桥梁工程所造成的影响。除此之外,为了有效加固桥梁工程建设区域地面的稳固性,可以对建设区域沉降地面进行建筑材料的填充。在进行沉降地面建筑材料填充时,首先要对地面区域沉降区域进行科学测量,提出形成区域地面区域沉降的真正原因,判断地面区域沉降问题处于何种发展阶段^[15]。如果地面区域沉降问题已经发展到中后期,地面区域沉降趋于稳定并不再出现连续沉降,则可以进行建筑材料的填充。其次,在进行建筑材料填充加固地面稳定性时,要分析地面区域沉降所产生缝隙的大小,进而选择适合的建筑材料进行填充。比如,地面区域沉降造成的地质缝隙较小时,可以采用细颗粒建筑材料制作成浇筑液体进行填充,也可以采用化学浇筑液进行填充。而对于地质缝隙较大的地面区域沉降问题可以选用颗粒较为粗大的建筑材料进行填充。

结论与建议

(1) 通过工程实例分析了高铁桥梁沉降变形特征,探讨了路基沉降对高铁桥梁的影响,针对沉降变形的影响因素,提出了高铁桥梁沉降防控技术,通过在桩基施工、支座选型及安装过程中进行优化安装工艺和加强质量管控,可有效减少工后沉降变形,实现高铁桥梁沉降的稳定控制。

(2) 随着国家铁路网规划越来越完善,高速铁路建设标准越来越高,对高铁运营的舒适性、安全性提出更高的要求,无砟轨道桥梁的设计使用比例也将随之升高,桥梁沉降变形控制将成为无砟轨道桥梁施工的重点。通过在桩基施工、支座选型及安装的过程中进行质量管控,可以有效减少工后沉降变形,实现高铁桥梁沉降的稳定控制。

参考文献

- [1] 张华. 软土地基桥墩非均匀沉降病害成因分析[D]. 广州大学, 2012.
- [2] 石瑞喜. 桥墩差异沉降规律及其对轨道高低平顺性的影响[J]. 四川建筑, 2013, 33(01): 94-95+99.
- [3] 陈兆玮. 高速铁路桥墩沉降对行车性能影响的研究[D]. 西南交通大学, 2017.
- [4] 陈兆玮, 孙宇, 翟婉明. 高速铁路桥墩沉降与钢轨变形的映射关系(I): 单元板式无砟轨道系统[J]. 中国科学: 技术科学, 2014, 44(07): 770-777.
- [5] 陈兆玮, 孙宇, 翟婉明. 高速铁路桥墩沉降与钢轨变形的映射关系(II): 纵连板式无砟轨道系统[J]. 中国科学: 技术科学, 2014, 44(07): 778-785.
- [6] 王龙. 地面区域沉降对高速铁路桥梁工程的影响及对策[J]. 运输经理世界, 2022, (32): 110-112.
- [7] 李妍. 管道下穿施工对既有铁路桥梁的影响研究[J]. 黑龙江交通科技, 2022, 45(09): 122-124.
- [8] 呼志明. 某公路下穿既有铁路桥梁安全影响分析[J]. 产业创新研究, 2022, (02): 142-144.
- [9] 普布扎西, 杜晓宇, 赵志强. 国道G109线下穿青藏铁路既有铁路桥梁方案选择分析及沉降观测研究[J]. 科学技术创新, 2022, (01): 125-128.
- [10] 李龙, 徐宇, 梁长海. 高铁桥梁典型长期变形对列车响应的影响研究[J]. 铁道标准设计, 2022, 66(09): 107-111.
- [11] 周涛, 徐方, 杨奇, 吴亚飞. 高速铁路桥梁桩基固结蠕变沉降计算方法研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18(08): 1968-1977.
- [12] 张超. 承压水降压引起的高速铁路桥梁摩擦型群桩沉降特性分析[J]. 铁道建筑, 2021, 61(06): 36-40.
- [13] 赵大亮. 软土地区铁路桥梁桩基试验及数值分析[J]. 路基工程, 2019, (06): 119-122.
- [14] 王胜. 高速铁路桥梁工程沉降观测及其数据分析[J]. 绿色环保建材, 2019, (06): 87-90.
- [15] 高永强. 石济客运专线并行京沪高速铁路桥梁工程沉降自动化监测[J]. 高速铁路技术, 2019, 10(02): 81-87.