

高速公路软基路段常见病害成因分析及预防对策

潘鸿娟

云南路桥股份有限公司 云南 昆明 650000

摘要: 高速公路作为国家交通骨干网络,建设质量与运营安全关乎区域经济及人民生命财产安全。我国东南沿海、长江中下游平原、内陆湖沼等地广泛分布深厚软弱地基,工程特性差,是高速公路建设重大技术难题,处理不当易在施工或运营期引发多种病害,严重影响道路使用性能与服役寿命。本文系统梳理了高速公路软基路段路基沉降、路面开裂等典型病害类型,从软土物理力学性质、荷载作用等多维度深入剖析其内在机理与成因。基于此,针对性提出涵盖勘察设计、地基处理等全生命周期的综合预防与处治对策。研究表明,软基路段病害防治需坚持“预防为主、防治结合”原则,通过精细化勘察、科学化设计、标准化施工和智能化监测,保障高速公路在软基地区长期稳定安全运营。

关键词: 高速公路;软弱地基;路基病害;沉降机理;地基处理;预防对策

引言

我国经济高速发展、城镇化推进,对高效交通网络需求迫切,高速公路建设规模与技术标准不断提升。但我国地域广、地质复杂,东部沿海、南方水网等区域普遍存在软弱土层,这类软土有高含水率等不良工程地质特征。高速公路穿越时,路堤填土荷载打破地基土体应力平衡,诱发复杂物理力学响应,导致工程病害。软基病害造成经济损失,威胁行车安全,损害社会形象。传统处治方法治标不治本且成本高。因此,深入研究软基病害形成机理,构建系统预防与控制体系,对提升高速公路建设水平、保障基础设施耐久性与安全性意义重大。本文系统分类常见病害,结合多学科原理探讨成因机制,从工程实践出发提出全生命周期有效预防与处治策略,为相关工程提供参考支撑。

1 高速公路软基路段常见病害类型

软基路段的病害表现形式多样,但其核心问题均源于软土地基在附加荷载作用下的变形与强度不足。根据病害发生的部位、形态及影响范围,可将其归纳为以下几类:

1.1 路基整体与差异沉降

路基沉降过程通常包含瞬时沉降、主固结沉降和次固结沉降(蠕变)三个阶段。整体沉降表现为路基沿纵向或横向大范围、相对均匀的下沉,虽然短期内对行车平顺性影响较小,但过量的整体沉降会降低路基设计标高,影响桥涵净空,甚至导致路面积水,埋下安全隐患。相比之下,差异沉降的危害更为突出,它是指路基不同部位之间产生的不均匀沉降。这种不均匀性常常源于地质条件的横向或纵向变化,例如软土层厚度突变、下卧硬层起伏、填土高度不均或地基处理方式的差异。纵向

差异沉降会导致路线纵断面呈现“波浪形”,严重影响行车舒适性;而横向差异沉降则使路基中心沉降量远大于两侧,形成“锅底”状凹陷,破坏路面原有的横坡设计,致使路表排水不畅,积水长期浸泡路基,进而形成恶性循环,加速病害的发展。

1.2 路面结构层开裂与破损

路基的不均匀沉降是导致路面开裂的直接诱因。当路基发生纵向差异沉降时,其上方的刚性或半刚性基层会因受到拉伸而产生横向裂缝。同样,路基的横向差异沉降或路基边缘因压实不足而发生的侧向挤出,则会在行车道轮迹带或路肩附近诱发纵向裂缝。在局部沉降异常严重或路基承载力极低的区域,路面结构层在车辆反复荷载的综合作用下,会承受复杂的应力状态,最终导致面层出现网状龟裂或不规则的块状裂缝^[1]。这些裂缝一旦形成,便为雨水下渗提供了通道,水分侵入后会迅速软化基层和路床,降低其承载能力,加速路面结构层的松散、剥落,最终演变为坑槽等结构性破坏,严重威胁行车安全。

1.3 路基边坡失稳与侧向位移

由于软土抗剪强度极低,在路堤自重及车辆荷载的共同作用下,土体容易沿某一潜在滑动面向外侧发生整体或局部的滑动,即边坡失稳。这一过程的宏观表现首先是路堤坡脚外侧地面出现鼓胀、隆起现象,这是土体在巨大侧压力作用下开始发生侧向挤出的前兆。随着变形的持续发展,路基顶部靠近边缘处会出现与路线平行的张拉裂缝,清晰地表明路基正在向外发生水平位移。若不加以控制,这种失稳趋势可能进一步恶化,在极端情况下,整个路堤连同其下的软弱地基土体可能发生大规模的滑移,造成灾难性的工程事故,不仅导致交通完全中

断,修复成本也将极其高昂。

1.4 桥头跳车

桥头跳车是软基路段极具代表性的病害之一,特指桥梁与路堤衔接处因沉降差异过大而形成的台阶。其根本原因在于结构体系的巨大差异:桥梁基础通常通过桩基深入至持力层较深、沉降几乎可以忽略的稳定地层,而与其相连的路堤则直接构筑在压缩性极高的软弱地基之上。即便对路堤段进行了地基处理,其漫长的工后沉降量也远非桥梁所能比拟。这种刚性结构与柔性路堤之间的巨大沉降差,在车辆高速通过时会产生剧烈的颠簸,即“跳车”现象。这不仅极大地损害了行车的舒适性和安全性,频繁的冲击荷载还会反过来加速桥梁搭板、支座以及路堤路面的疲劳损坏,形成一个难以根治的工程顽疾。

1.5 排水系统失效

软基路段的沉降,尤其是不均匀沉降,会对沿线精心设计的排水设施造成毁灭性的破坏。路基的整体或局部下沉会导致边沟、排水沟等设施发生变形、断裂甚至错台,使其完全丧失集水和排水功能。同样,涵洞和通道如果其基础未得到有效加固,也会随路基一同沉降,轻则造成进出口衔接不顺,形成新的积水点,重则引起管节被拉开、结构漏水乃至整体破坏。此外,中央分隔带的排水系统也极易受沉降影响,沉降改变了原有的纵坡,使得分隔带内汇集的渗水无法顺利排出,长期滞留并下渗,持续软化下方的路基,从而与路基沉降问题相互交织,形成一个难以打破的恶性循环。

2 软基路段病害成因机理分析

软基路段病害的产生是多种因素耦合作用的结果。软土自身不良物理力学性质是病害滋生的内因和物质基础,其天然含水率极高、孔隙比大,土体结构疏松、颗粒连接微弱,表现出高压缩性,易产生沉降;抗剪强度低,受扰动或荷载作用强度急剧下降;渗透系数小,孔隙水消散缓慢,主固结沉降延续时间长,工后沉降预测和控制困难;还具有流变特性,会产生次固结沉降,对高速公路构成长期威胁。外部荷载是激发病害的因素,路堤填土自重构成主要静荷载,填筑高度越高,附加应力越大,沉降和侧向位移越显著,填筑速率过快易诱发地基整体失稳;车辆行驶产生的动荷载日复一日作用,会对处于不利应力状态的路基和路面结构产生疲劳效应,加速路面开裂破损,在差异沉降区域冲击效应会被放大,加剧结构劣化^[2]。水文地质条件在病害演化中起“催化剂”作用,地下水位动态变化影响软土工程性质,雨季地下水位上升增加含水率、降低有效应力和抗剪强度;强降雨渗入路基软化路床和填料、降低承载能力,还会补给地下

水抬升水位;地表排水系统不合理或维护不善,地表径流会冲刷路基边坡、掏空坡脚,削弱边坡稳定性。工程勘察、设计与施工的人为因素也至关重要,勘察阶段疏忽会导致对软土层认识偏差,为设计埋下隐患;设计阶段方案选择不当、采用简化计算模型,会使对工后沉降和稳定性预测与实际不符,特殊部位未加强会致跳车病害;施工阶段未遵循原则、偷工减料、填料质量不合格等,会使前期努力付诸东流,最终酿成病害。

3 软基路段病害的预防与处治对策

针对上述成因,必须建立一套覆盖项目全生命周期的、多层次、多手段的综合防控体系。

3.1 勘察设计阶段:精准识别,科学预判

成功的软基处理始于精准的勘察与科学的设计。在勘察阶段,应摒弃单一的钻探手段,转而采用“遥感+物探+钻探+原位测试+室内试验”相结合的综合勘察方法。通过加密勘探点,尤其是在地质条件复杂多变的区域和桥涵构造物位置,能够更精细地刻画软土的空间分布。采用先进的薄壁取土器获取高质量的I级原状土样,并辅以十字板剪切试验(VST)、静力触探(CPT)等原位测试,可以最大限度地还原土体的真实强度和变形参数,为设计提供可靠依据。在设计阶段,应充分利用现代数值模拟技术,采用能够考虑软土非线性、弹塑性、固结-蠕变耦合等复杂特性的有限元软件进行沉降和稳定性分析,替代过于简化的传统手算方法。通过反演分析,利用施工前期的监测数据不断修正和完善数值模型,可以显著提高对长期沉降的预测精度^[3]。在线路平纵面设计上,应尽可能在选线阶段绕避深厚软基区域;若无法避让,则应优先考虑低路堤方案以减少附加荷载,并在纵断面设计中预留充足的“预压期”和“超载预压”高度,以加速沉降在施工期内完成。针对不同的软基条件,应科学比选地基处理方案,浅层软基可采用换填法,中深层软基常用堆载/真空预压配合排水板或复合地基法,而对于深厚软基,则可考虑轻质路堤或桩-网复合结构等创新技术。特别是对于桥头段,必须采用刚性桩(如管桩、CFG桩)进行处理,并严格控制其与桥梁之间的工后沉降差。

3.2 施工阶段:动态控制,确保质量

施工阶段是将设计蓝图转化为实体工程的关键环节,也是病害防控的最后一道防线。其核心理念是推行信息化施工(Observational Method)。这意味着必须在施工过程中布设一套完善的监测系统,包括沉降板、分层沉降仪、测斜管和孔隙水压力计等,对地基的沉降速率、水平位移和孔隙水压力变化进行实时、连续的监控。施工

管理人员必须依据这些实时反馈的数据，动态调整填筑速率。一旦监测数据显示沉降速率或侧向位移超过预先设定的安全预警阈值，就必须立即暂停填筑作业，给予地基充分的固结时间，待其稳定后再继续施工，坚决杜绝为了抢工期而忽视安全的行为。同时，必须对地基处理的施工质量进行全过程、全方位的严格把控。无论是塑料排水板的打设深度与回带长度，还是水泥搅拌桩的水泥掺量、喷浆均匀性与桩长，亦或是碎石桩的密实电流，都应有专人旁站监理，并通过严格的检测手段确保每一项指标都达到设计要求^[4]。此外，完善的排水系统是软基路段的生命线，施工期间必须设置有效的临时排水沟，防止地表水浸泡作业面；永久性排水设施应与路基同步施工，并在设计时就考虑其对不均匀沉降的适应能力，确保其长期功能的可靠性。

3.3 运营养护阶段：智能监测，主动干预

高速公路的服役寿命长达数十年，因此运营养护阶段的持续关注至关重要。应在通车后，对历史上沉降较大或地质条件复杂的重点软基路段，特别是桥头过渡段，继续实施长期健康监测。借助物联网、大数据和云计算等现代信息技术，构建自动化、智能化的监测预警平台，实现监测数据的自动采集、远程传输、智能分析和分级预警，变被动抢险为主动预防。在日常养护工作中，应大力推行预防性养护理念。一旦巡检发现路面出现早期微裂缝，应立即采取封缝等措施，有效阻断雨水下渗的路径。同时，要定期对全线的排水系统进行疏通和维护，确保其时刻处于畅通状态。对于已经发生的病害，处治工作必须建立在科学诊断的基础之上。应首先通过详细的调查和检测，准确查明病害的根本原因，然后才能“对症下药”。例如，对于差异沉降引起的路面开裂，可综合评估

后采用注浆抬升、铺设高性能应力吸收层（SAM）或局部铣刨重铺等方式；而对于顽固的桥头跳车问题，则可考虑台背注浆加固、增设或更换搭板、甚至延长柔性过渡段等系统性解决方案。

4 结语

高速公路软基路段病害防治是复杂系统工程，本文经梳理常见病害类型、深入分析成因机理得出结论：软基病害根本在于软土不良工程特性，在外部因素作用下有显著沉降等行为；路基整体与差异沉降是病害源头，引发一系列连锁反应，影响道路使用性能与安全；有效防治需贯穿项目全生命周期，勘察设计阶段要精准识别与科学预判，施工阶段要确保质量，运营养护阶段要智能监测预警并预防性养护。展望未来，软基工程研究与实践将向精细化、智能化、绿色化发展，基于人工智能等的沉降预测模型有望提高预测精度，新型环保地基处理材料和低碳施工工艺将获更多关注，唯有持续创新、紧密结合理论实践，才能攻克软基难题，为建设“平安百年品质工程”奠基。

参考文献

- [1]文斌,张从军,郝宇萌,等.某高速公路深厚软基路桥过渡段跳车病害处治研究[J].路基工程,2024,(01):173-181.
- [2]谢杰辉.滨海软基高速公路沉降变形机制及病害防治对策[D].华南理工大学,2022.DOI:10.27151/d.cnki.ghnlu.2022.005061.
- [3]欧苏北,俞红光,蒋军军.沿海某运营期沿河高速公路软基边坡路段失稳及路基处治分析[J].工程技术研究,2023,8(03):14-17.
- [4]罗思欣,刘伟文.高速公路改扩建工程深层软基路段路-桥方案比选[J].广东公路交通,2023,49(06):13-16+21.