

软土地区改扩建公路沉降控制设计及处治措施分析

崔 伟

安徽省交设建设工程有限公司 安徽 合肥 230088

【摘 要】：公路工程软基路基沉降是指在公路使用过程中，由于软基土质松软、沉降较大或其他因素导致路基沉降的现象。这种情况在公路工程中比较常见，对公路的使用安全和持久性都会产生一定影响。本文以某沿江地区一级公路改扩建项目为依托，结合项目软土地层分布特征，分析改扩建路基沉降产生核心机理，明确沉降控制设计基本原则，从地基优化设计、路基断面拼接设计、路面结构协同设计三个维度制定专项设计方案，配套分级差异化软基处治措施。经工程应用验证，该套设计与处治体系可有效抑制整体沉降与新旧路基差异沉降，满足公路改扩建工程设计规范要求，可为同类软土地区公路改扩建项目提供参考。

【关键词】：软土地区；公路改扩建；沉降控制；路基设计；地基处治

DOI:10.12417/2811-0528.26.17.031

1 引言

软土地区路基是指在软土地层上修筑的路基工程体系。软土特指水下沉积形成的天然含水量高、孔隙比 ≥ 1.0 的软弱饱和和粘性土层，主要包括淤泥、淤泥质土、泥炭、泥炭质土等，具有压缩性高、强度低、透水性差等特征，易引发路基沉降、坍塌及不均匀沉降等病害。软土地区选线需避开厚层分布区，优先选择软土薄层地带，避免穿越古盆地中部、封闭洼地或岩层陡坡处，并远离河流湖塘等水体。地基处理方案分为改善地基和改良荷重结构两类，前者包括换土法、抛石挤淤，后者涵盖反压护道、轻质填料等技术。由于软土的高压缩性和低承载力，在荷载作用下容易发生不均匀沉降，进而影响路面稳定性与使用安全。从软土地区路基沉降的机理出发，探讨了影响沉降的主要因素，并详细分析了几种常见的沉降控制技术，包括地基处理、路基加固、施工控制、排水与防水措施以及沉降监测等技术。针对软土的特殊性质，采用换填、预压等方法可有效提高地基稳定性，预防后期沉降。特别是在地基处理的过程中，深层搅拌与土工格栅加固被证明能够有效减少不均匀沉降，提高路基承载力。通过合理设计施工方案和科学的排水系统，不仅能够解决软土的沉降问题，还能显著缩短固结时间，为公路工程建设的可持续性和长期运营提供保障。

2 工程概况

2.1 项目基本情况

本次研究对象为安徽某沿江一级公路改扩建工程，该道路原来的建成通车时间是 12 年，原路基宽度为 12.5m，双向两车道，为了适应区域交通量的增长需要，本次采用双侧拼宽的方式进行改扩建，改造后路基宽度扩大到了 25.5m，升级为双向四车道，设计行车速度为 80km/h，路线全长为 8.6km。本项目全线为软土区，主要改造内容有路基拼宽、部分旧路病害

处治、路面结构改善和附属构筑物同步升级。

2.2 工程地质条件

经过地质勘察探明，本工程沿线地层自上而下依次为素填土层、淤泥质软土层、粉质黏土层和风化岩层，淤泥质软土是主要的不良土层，一般分布在地表以下 1.5-16.0m 范围内，土层厚度分布不均，局部地段软土厚度大于 15m。该软土天然含水率均值为 58.6%，孔隙比为 1.52，压缩系数为 0.87MPa^{-1} ，承载力特征值为 70 到 90kPa，固结速度慢，受荷载扰动后容易出现不均匀变形，沉降控制比较困难。沿线软土主要的物理力学指标见表 1。

表 1 沿线土体物理力学核心指标

土层类型	天然 含水 率/%	孔隙 比	压缩 系数 /MPa ⁻¹	承载力 特征值 /kPa	渗透系数 /(cm · s ⁻¹)
素填土	26.3	0.78	0.35	160	3.2×10^{-4}
淤泥质软土	58.6	1.52	0.87	80	4.5×10^{-6}
粉质黏土	32.5	0.91	0.42	220	1.8×10^{-5}

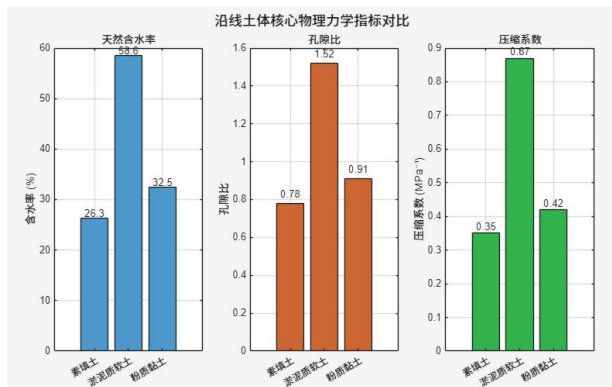


图1 土体核心物理力学指标对比

2.3 工程重难点

一是新旧路基变形协调难度大，旧路基沉降基本稳定，新建拼宽路基软基固结沉降周期达2~3年，沉降差值超过规范允许值；二是软土厚度分布不均，单个方案不能适应全路段；三是路基拼接断面结构复杂，拼接界面容易产生应力集中，加重沉降开裂危险；四是改扩建工程要兼顾旧路正常通行，设计方案既要考虑稳定性又要考虑通行便利性。

3 软土改扩建路基沉降成因分析

3.1 地基土体固结变形

软土内部孔隙含量高、填充大量自由水，拼宽路基填筑完成后，上部填筑体加上车辆附加荷载，就会向下传给软土地基，使土体内孔隙水慢慢排出，孔隙体积变小，造成地基固结沉降。该类沉降分为瞬时沉降、主固结沉降和次固结沉降三个阶段，次固结沉降时间最长，也是产生后期路面长期变形的主要原因。项目区软土渗透性差，排水固结效率低，沉降时间更长。

3.2 新旧路基结构差异

旧路基经过十几年的服役，土体在长期荷载的作用下已经完成了固结，土体密实度高、压缩性低。即使新拼宽路基的填筑材料严格按压实标准执行，其初始固结度也远远小于旧路基。在相同的外部荷载作用下，拼宽路基及下部地基沉降量比旧路基大得多，拼接界面处出现竖向沉降差，进而使路面结构内部产生拉应力，当拉应力超过路面材料的抗拉极限时，就会出现纵向裂缝。

3.3 路基拼接设计缺陷

部分改扩建工程的设计阶段没有考虑到软土的特性而对拼接结构进行优化，拼接边坡坡度不合理、新旧路基结合面缺少过渡结构、加筋材料布置面积不够，造成结合面整体性差。荷载作用下新旧路基发生相对滑移，加大了差异沉降。另外，局部路段地基设计参数取值单一，没有按照软土厚度分层差异

化设计，浅层和深层软土变形不能同步控制。

4 沉降控制总体设计原则

根据本项目地质条件及改扩建特点，以现行的《公路软土地基路堤设计规范》、《公路路面基层施工技术细则》为依据，提出四个设计原则，从顶层约束沉降控制设计工作入手。

第一是分层适配的原则。根据沿线软土埋深、土层厚度、物理指标，将项目路段划分为浅层软土段、中层软土段、厚层软土段，分别对应不同的地基加固、路基拼接设计方案，杜绝统一的设计模式。第二是变形协调原则。以减小新旧路基沉降差值为根本目的，控制总沉降量和差异沉降量两个指标，一般路段工后总沉降不大于15cm，新旧路基差异沉降不大于6cm，桥头过渡段差异沉降不大于3cm。第三，结构协同原则。统筹地基、路基、路面三个结构层次，改善各个结构层次的结构参数，加强拼接界面的整体性，使下部地基、中部路基、上部路面共同变形，分散界面集中应力。

5 沉降控制专项设计方案

5.1 软土地基优化设计

按照分层适配原则，对全线软土路段进行分段设计，根据软土厚度选择对应的地基结构设计形式，优化地基垫层参数，提高应力分散和排水固结能力，各路段地基设计方案见表2。

表2 分段地基优化设计方案

路段类型	软土厚度/m	地基设计方案	核心设计参数	适用桩号范围
浅层软土段	0~3	软弱土层换填+碎石垫层	换填级配碎石厚度2.0m，垫层厚度0.6m，压实度≥96%	K1+200-K2+500
中层软土段	3~10	水泥土搅拌桩复合地基	桩径50cm，正三角形布置，桩间距1.4m，桩长穿透软土层	K2+500-K6+800
厚层软土段	>10	预应力管桩+真空预压联合地基	管桩桩径500mm，桩间距2.0m，真空预压维持80kPa，预压周期50d	K6+800-K9+800

所有路段的地基顶部都设置碎石垫层，碎石垫层内设置双向土工格栅，横向抗拉强度不小于80kN/m，可以均匀分散上部填筑荷载，减小地基局部应力集中，又能快速排出土体孔隙

水,加快软土固结。换填材料一律采用级配良好的碎石混合料,含泥量控制在 3%以下,保证换填层的整体性。

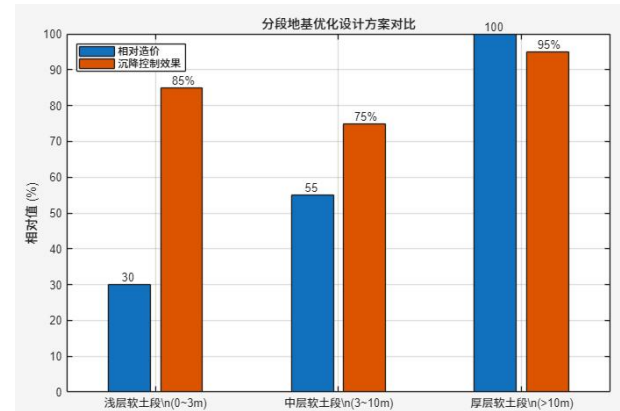


图 2 分段地基优化设计方案对比

5.2 路基拼接结构设计

路基拼接是改扩建项目沉降控制的关键环节,本项目摒弃了传统的直坡拼接方式,采用台阶式拼接加筋补强一体化设计。对旧路基拼接侧边进行削坡处理,从上到下开挖多级台阶,台阶高度统一设置为 1.0m,台阶宽度 2.0m,台阶内侧设置 2% 向内倾斜坡度,提高新旧土体咬合程度。新旧路基结合台阶分层铺设土工格栅,格栅布设间距 0.5m,布设范围延伸到拼宽路基全幅,向旧路基台阶内侧延伸 1.5m,提高结合面抗滑移能力。拼宽路基填筑材料优先选择轻质改良填料,用轻质粉煤灰混合料代替常规素土,降低填筑体自重,从源头上减少地基附加应力,有效地控制固结沉降。另外在路基渐变段上设置 150m 过渡区,防止由于断面突然变化而产生应力集中。

5.3 路面结构协同设计

为了防止路基沉降,防止路面开裂,项目中采用不同的路面结构。对于旧路基沉降稳定区段,保留完好沥青面层,只对破损处进行铣刨重铺;对拼宽路基和拼接结合区段,优化路面基层结构,加设应力吸收层,使用柔性改性沥青材料,提高路面结构的抗变形能力。同时改变拼接处路面结构层厚度,基层比常规路段厚 10cm,采用双层水稳碎石基层,分散竖向荷载;面层用细粒式改性沥青混凝土,弱化沉降差引起的拉裂影响。桥头过渡段路面增设渐变补强层,使路面刚度平滑过渡,解决桥头跳车问题。

6 分级差异化处治措施

6.1 浅层软土换填处治

浅层软土路段软土埋藏浅、厚度小,大范围固结沉降风险小,主要隐患为表层土体承载力不足。处理重点是清除表层软弱淤泥质土,换填高强度、低压缩性级配碎石,同时改善垫层

结构。换填完成后对换填层进行静力压实,严格控制压实指标,表层铺设复合型土工格栅,控制浅层土体侧向变形。该处治方式结构简单、稳定性好,可以直接消除浅层软土变形隐患。

6.2 中层软土复合地基处治

中层软土路段软土厚度适中,用水泥土搅拌桩复合地基处治,依靠桩体承载和桩间土协同受力模式来提高地基整体承载力。设计阶段准确计算单桩承载力和桩土分担比,保证桩体穿透淤泥质软土层,嵌入下部硬质粉质粘土层。桩体成型后,在桩顶铺设碎石垫层和土工格栅,形成复合受力结构,减小地基整体压缩性,使工后沉降在设计范围内。该方案适合中等厚度软土,性价比高,适合本项目大部分主干路段。

6.3 厚层软土联合处治

厚层软土路段土体固结时间长、沉降量大,单一类型的加固措施不能达到设计标准,采用预应力管桩加真空预压联合处治。预应力管桩承受上部大部分荷载,抑制深层土体大幅度沉降;真空预压技术迅速排出软土内部孔隙水,加快深层软土固结,缩短沉降稳定时间。两种技术互相补充,既可以解决深层软土长期沉降的问题,又可以避免桩基单独设置成本过高问题,适合本项目软土厚度大于 10m 的特殊路段。

6.4 拼接界面专项处治

除路基台阶和加筋外,对新老路基结合面做专门处理,清除旧路基台阶表面的松散土体,涂刷水泥净浆提高新旧土体的粘结性。在结合面底部设排水盲沟,及时排除界面积水,防止积水软化土体造成局部沉降。同时对拼宽路基填料的含水率和压实度进行限定,与常规路段相比,压实度标准提高 1 到 2 个百分点,减少新老路基密实度差值。

7 工程应用效果分析

本项目全线按上述设计方案及处治措施实施,项目改造完成后,对全线布设沉降观测点位,持续进行 6 个月沉降监测,分别采集浅层、中层、厚层软土路段工后沉降数据,统计结果见表 3。

表 3 各路段工后沉降监测数据

路段类型	平均总沉降量/cm	新旧路基差异沉降/cm	沉降稳定周期/d	病害发生率/%
浅层软土段	7.2	2.1	95	0
中层软土段	10.5	3.6	130	0.8
厚层软土段	13.8	5.2	165	1.2

从监测数据可知,全路段工后总沉降和差异沉降均达到设计控制范围之内,远小于规范的上限值,沉降稳定周期大大缩短,没有发生大面积的纵向裂缝、路基陷落等病害,只有薄层软土局部过渡段有轻微的表层裂纹,经过简单的表层修补后就可以恢复正常。本项目相比同区域未做分层设计、不同处理的类似改扩建工程,沉降量平均降低 35%,差异沉降降低 42%,病害发生率降低 85%,设计方案及处治措施具有较好的应用效果。

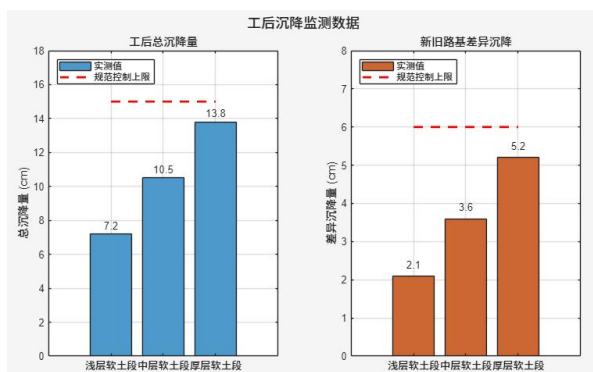


图3 沉降监测数据

8 结论

本文以沿江软土地区一级公路改扩建工程为研究对象,从设计角度出发,根据软土的物理特性及改扩建路基沉降的原因,提出分层适配、变形协同的沉降控制设计体系,并配套分级差异化处治措施,得出如下结论。

第一,软土地区改扩建路基沉降主要由软土固结变形、新旧路基结构密实度不同、拼接结构设计不合理造成,外部荷载和雨水环境也会使沉降病害加重,设计阶段需要综合考虑地基、路基、路面三个结构,达到一体化沉降控制的目的。

第二,根据软土埋藏厚度将路段分为浅层、中层、厚层三类,分别采用换填加固、水泥土搅拌桩复合地基、管桩联合真空预压的分段设计模式,可以精准匹配不同的地质情况,避免统一化设计的不足。采用台阶式加筋拼接结构与柔性路面联合设计,可以较好地控制新旧路基的变形。

第三,对应分级差异化处治措施可以辅助设计方案的实施,全方位控制整体沉降和差异沉降。工程监测结果表明,该套技术体系稳定性好、适应性强,可以明显减少改扩建公路沉降病害的发生。

参考文献:

- [1] 王林,孙兆云,翁志强,等.软土地区高速公路改扩建路基沉降特性和控制技术[J].市政技术,2025,43(9):92-99.
- [2] 龙良娅.软土地区公路改扩建工程中路基沉降控制技术研究[J].交通建设与管理,2024,(6):112-114.
- [3] 毛媛.软土路基控制不均匀沉降方案设计研究[J].交通世界,2024,(25):78-81.
- [4] 孙天垠,杨泽涵.改扩建工程精细化勘察设计思考与实践[J].公路,2024,69(7):301-305.
- [5] 韦明.基于搭板设计的高速公路改扩建中路桥过渡段差异沉降控制方法[J].交通世界,2024,(9):107-110.