

城市道路工程深层软土路基处理方式的应用

何维维

杭州市城建设计研究院有限公司珠海分公司

摘要：软土路基一旦无法妥善处理会对道路工程质量造成严重的负面影响，甚至诱发安全事故。在长期的工程实践下积累了大量的相关经验，针对软土路基常用的处理方式主要包含了排水固结和桩体复合地基等，但不同处理方式的效果与成本具有差异性，需要根据实际情况选择。基于此，文章对深层软土路基的特点进行分析，并对常用的几种处理方式进行对比，结合相关的工程经验讨论具体处理方式的应用要点。

关键词：城市道路；深层软土；软土路基；处理方式

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2022.19.046

软土路基一般含水量大、孔隙较大、变形能力强、抗剪强度低，在道路工程中软土路基处理不当，会导致道路结构失衡，道路的使用功能降低，严重情况下可能导致工程出现重大病害或在使用期间出现严重交通事故。深层软土路基由于深藏于地下，与常规施工作业面相距较远，常规的处理措施难以取得预想成果，但软土路基的存在会对路基及路面的整体结构产生不利影响，必须要采取有效措施进行控制，而在不同工程中甚至同个工程的不同位置，深层软土路基及周边施工环境的具体情况存在实质性差异，必须根据具体情况采取相应的处理方式，以确保工程质量、造价、施工进度和施工安全。

一、深层软土路基的特点

（一）深层软土路基的基本特征

软土一般指淤泥和淤泥质土的总称，一般为含水量大、压缩性强且承载力较差的软塑至流塑性质的黏性土，且土质中多含相对丰富的有机质。以淤泥和淤泥质土为例，此类黏性土一般由水流作用淤积泥沙为主，天然孔隙率在1.0以上，天然水量高于液限，以天然孔隙比大于1.5的为淤泥，天然孔隙比在1.0~1.5的为淤泥质土；灼烧量大于60%的为泥炭，灼烧量5%的为有机质土。软土在我国分布较广，常见于沿海、河、湖地区，如浙江宁波-上海一带、松辽平原、闽江口平原、洞庭湖及鄱阳湖边缘地带等，在内陆古河道、古湖泊、河流支沟与冲沟地带、内涝浅凹地带等，但在不同地区分布的软土各具特点，主要为组成软土的成分差异和软土的深厚程度差异，厚度在几米到几十米不等，以珠三角沿海地区为典型软土层厚度平均在20m~45m，对现代建设工程的困扰较大。深层软土路基是厚度较高的软土典型，主要特点是软土所处地层较深且一般厚度较高，常规的软土路基加固处理基础难以取得理想的效果，其具备一般软土路基的基本特征，但处理的技术要求更高。

（二）深层软土路基的危害性

深层软土路基缺少应有的稳定性，这主要是基于其

物理缺陷而形成的。相较于一般软土路基而言，深层软土路基更具隐蔽性和不可控性，下部软土与地下水之间的关联紧密，含水量控制困难，且单独采用强夯、换填等措施也难以取得预期效果。在物理缺陷方面，深层软土路基表现为：触变性高，原状土在受到外力振动作用后，土质可能变成流体状态或稀释状态，土质灵敏度可能达到8以上；在剪应力条件下，软土路基部分会出现持续性形变，尤其在道路边坡、路堤等位置，易形成土体崩坏、位移等情况；深层软土压缩系数大，垂直压力若大于100Pa则可能形成明显沉降，道路工程中各类机械作业、材料设备堆载、后期行车等的瞬时压力和持续性压力都可能造成路基大幅度沉降；软土路基的排水性能差，尤其在周边有加固类型处理之后，未处理到位的路基部分会形成地下水集中区，又因为土质本身富含有机质，时间稍长会造成周边其他土质的变质，加大路基沉降问题；受沉积环境的影响，软土路基中会夹杂粉土或其他物质，造成软土路基中的水平及垂直物质分布不均，整个软土路基表现出不均匀性而缺少稳定度。因此，深层软土路基的危害结果表现为：影响施工安全和施工进度，施工质量难以保障；道路工程完成后，后期维护难度和维护成本加大，行车舒适感和安全性欠缺。

二、常用处理方法

（一）深层软土路基的处理考量

深层软土路基的处理主要是强化路基的基本物理属性，确保路基符合道路工程的使用需求。一方面是沉降控制，通过预压、排水等办法加速软土层沉降，提高软土层结构能力，或通过换填、设置桩基础等降低沉降总量，提高路基强度；另一方面是提高稳定性，即在沉降控制的基础上，又要保障路基的总体结构性，通过各种加固技术持续保证路基强度，增加路基的抗滑阻力。深层软土在处理时需要考虑多方面的因素，在综合权衡之后选择合适的处理方法，主要如下：①土质条件，包括土壤的构成、深度、孔隙率、抗压强度、含水量等，根据土质的具体构成选择对应的处理方法或复合方案；②道路用途，需要综合考虑基于道路用途下的交通量、行车荷载、预计使用年限等，对道路工程在使用中的沉降情况进行预判，根据道路所需达到的抗压和耐久指标选择对应的软基处理方法和执行标准；③周边环境，处理过程中需要考虑因施工作业造成的周边环境的影响，包括处理振动效果对周边土体造成的扰动、水泥或相应材料使用后周边土体结构的变化，排水固结措施下地下水位的变化和地下水污染等。④施工环境，主要考虑现场条件是否满足施工要求，如机械及材料的安置空间、道路条件等，能否满足高效快速施工的基本要求。

（二）基本处理依据

深层软土路基的处理依据以国家相关标准和规范为准，包括但不限于《公路工程路基施工技术规范》《建筑地基处理技术规范》等，同时使用具体的工艺和设备应参照国家和地方的技术指标和施工要求进行。此外，深层软土路基的处理依据还包括施工现场的实际情况，由技术团队对现场软土的分布、厚度、组成、地下水位情况进行充分调查并分析，对各类风险进行评估，经专家组讨论后制定并修改方案。

（三）常用处理措施

目前在深层软土路基处理中，相对常用的处理措施主要有排水固结法、桩体复合地基法两大类。

排水固结法包含：①真空预压法，在软土中设置砂井、塑料排水板等竖向排水装置，于地表铺设一定厚度（一般为30~50cm）的砂垫层，在砂垫层之上设置一层薄膜，于膜下抽气形成负压，在负压挤压影响下，薄膜下方的孔隙水集中至竖向排水装置中，软土获得固结效果。②堆载预压法，与真空预压法原理类似，先设置竖向排水装置，再于地面施加载荷，软土中的孔隙水受载荷应力被缓慢挤出，孔隙变小，路基逐渐固结，直至软土强度达到预期值后进行卸载操作。③真空联合堆载预压法，在单一采取真空预压或堆载预压难以达到效果的

情况下，同时采用真空预压和堆载预压处理方法。

桩体复合地基法，通过设置桩体提高土层的力学抗性和结构稳定性，主要包括：①刚性桩，包含灌注桩与预制桩，如LCG桩、CFG桩、预制方桩、预制管桩等。在施工方面，灌注桩应注意清孔，孔底沉渣厚度应控制在10cm以内，灌注的混凝土含砂率一般在50%以内，灌注时需保证泥浆面高于地下水位0.8m~1m，若涉及水下灌注且水位有涨落，则需要保持浆面高出最高水位至少1.2m。②柔性桩，以水泥搅拌桩为主，如旋喷桩、钉形水泥土搅拌桩等。在长期的施工运用中，柔性桩积累了相对成熟的经验，代表性操作技艺包括“二喷四搅”“四喷四搅”等，国家也对相应的施工技术工艺提出了具体的规定，其中包含了浆液材料的比例、浆液输送的压强、成桩质量指标等。

受地质条件、工程设计标准、施工条件等要求，单一采用某种方法难以达到预期效果，由此产生了以项目实际情况为依据的综合类方法，以达到保障工程质量、控制工程进度与成本的目的，如刚-柔性桩复合地基法、桩体复合地基+排水固结法、真空-堆载联合预压法等。各类常用深层软基处理方法的基本情况比较如表1所示。

表1 常用深层软基处理方法

| 类型 | 方法 | 用途 | 优点 | 缺点 | 参考价 |
|------|-------|------------|-------------------|--------------------------|---------------------------|
| 排水固结 | 堆载预压 | 深层软基 | 造价低，沉降均匀 | 工期相对较长 | 400~600元/m ² |
| | 真空预压 | 深层软基 | 造价较低，沉降均匀，施工面积广 | 施工要求高，工期相对较长 | 300~500元/m ² |
| | 联合预压 | 深层软基 | 造价较低，沉降均匀，施工面积广 | 施工要求高，工期相对较长，现场管理难 | 500~700元/m ² |
| 刚性桩 | 现浇桩 | 深层软基（<25m） | 桩体强度高，质量易控制 | 处理淤泥质土和淤泥时充盈系数会增加，造价相应增高 | 1300~1500元/m ² |
| | 预制桩 | 深层软基 | 工期短，质量易控制 | 造价成本高 | 1800~2000元/m ² |
| 柔性桩 | 搅拌桩 | 深层软基（<15m） | 机械和人员数量可增加，同时缩短工期 | 处理深度有限，超过15m时质量难以控制 | 1000~1200元/m ² |
| | 钉形搅拌桩 | 深层软基（<25m） | 桩体强度高，质量易控制，造价低 | 技术相对较新，施工要求较高，需要培训 | 1200~1500元/m ² |
| | 旋喷桩 | 深层软基（<25m） | 桩体强度高，质量易控制，操作便捷 | 造价高，技术要求高 | 2200~2500元/m ² |
| 综合法 | —— | 深层软基 | 工期较短，质量易控制 | 造价高，技术要求高 | —— |

（四）深层软土路基处理方法的发展

部分工程所在地自然条件复杂，深层软土路基的成分组成复杂，需要考虑采用除既有常用综合手段之外的处理方法，以实现深层水的有效控制，提高深层软土路基的结构强度，此类尝试目前在我国各地建筑工程中均有所见，其中较为实用的有：①深层石灰桩搅拌技术，具体工艺与水泥搅拌桩类似，选用材料为石灰，石灰与深层软土搅拌之后吸收大量的水分，降低了原土壤的水含量，提高了软土的结构能力，石灰搅拌桩的强度在后续会持续增加，在加入一定的外加剂后，水化胶结

效果还会进一步增加，根据现有的工程建设经验，使用石灰搅拌桩技术桩身强度可达到1MPa，可以有效应对多种软土环境。②涉水区域的软基疏浚技术，利用挖泥机将涉水区域内的淤泥清离，常用抓斗挖掘、泵吸、刀吸等，以抓斗运用最为便捷，不仅可以避免天气和航运等的影响，还可以实现高精度作业，淤泥清离时更为快速有效，但抓斗施工时会会对周边土壤造成扰动，挖掘之后可能会导致返淤现象。水下疏浚技术可以降低涉水区域软基处理的难度，在适用该类技术时还应当注重对周边环境的保护并妥善清离淤泥。

三、实践案例

(一) 工程概况

案例工程位于沿海地区,属市政配套基础设施工程的组成部分,道路工程实施全长为1.7km。工程区域内地下水丰富,地下水与河流之间联系呈季节性规律,雨季为河流补给地下水,旱季为地下水补给河流。现场地层岩性组成复杂,主要为第四系地层,包括人工填土、海陆交互相沉积层、冲洪积层、残积层及燕山三期积层,具体描述自地表而下依次为:①素填土,含砂土、少量黏性土和粉土,未固结,均厚3.45m;②杂填土,包括碎石土、抛石和砂土及黏性土,未固结,均厚4.52m;③淤泥,灰黑色流塑状淤泥,均厚24.26m;④粉质黏土,黄白色、浅黄色、黄灰色等可塑状与硬塑状黏土,黏性较好,均厚4.55m;⑤淤泥质黏土,灰黑色黏土,流塑状局部软塑状,含粉砂,均厚4.92m;⑥强风化花岗岩,呈灰褐斑色、灰黄斑色等,为半土半岩或碎块状的极软岩,遇水后容易崩解,均厚5.69m。根据现场勘测,工程场地所分布的软土深度均值在25m以上。道路设计要求15年内路面沉降在50cm以下,人行通道和箱涵等小型构筑物沉降在30cm以下,淤泥整体固结度在90%以上,道路强度应在100KPa以上。鉴于道路软基部分较厚,建设时必须优先应对路基沉降与变形问题,根据深层路基的实际情况确定处理方案。

(二) 方案选取

出于控制施工进度和成本考虑,依据现场施工要求和施工环境,选取方案主要以真空联合堆载预压法为主,在路基与构筑物过渡段,考虑预压法会对构筑物产生影响,选择使用复合地基法(双向水泥搅拌桩)进行处理,具体如下:

①真空联合堆载预压法。选用C形塑料排水板,设置深度以软土路基土底标高为准,最深控制在28m以内,宽度为道路红线外延10m,采用正方形规则布置,膜下真空压力值为80~90KPa,真空处理120~130d后预压荷载为路堤自重,设置双排式黏土密封墙进行密封。在联合预压期间两侧布置深层测斜管观测变形影响深度和强度,设置浅层沉降版观测基本沉降情况,根据三点法推算竖向变形量,基本公式为:

$$S_f = \frac{S_c(S_b - S_a) - (S_b - S_c)}{(S_b - S_a) - (S_b - S_c)}$$

式中 S_f 为竖向变量结果, s_a , s_b , s_c 分别为施加载荷后a、b、c三个时间段,且 $b-a=c-b$ 。

以变形差值作为软基处理后沉降量的主要判定依据,并由此推算固结度,推算公式为:

$$\bar{U} = \frac{S_t}{S_f}$$

式中 \bar{U} 为预压处理停止后的软土路基固结度, s_t 为堆载预压停止时的软土路基竖向变形量。

②双向水泥搅拌桩复合地基法。

淤泥较深,且含水量均值达到了62%,十字板抗剪强度小于20KPa,经分析采用CFG桩成桩质量较差,而双向水泥搅拌桩处理深度较深,处理效果较单向水泥搅拌桩较好,因此采用双向水泥搅拌桩处理方案。搅拌桩桩径50cm,按正三角形布设,桩间距1.2m,桩长平均19m,设计要求28d桩身无侧限抗压强度达到0.8MPa以上,90d桩身无侧限抗压强度达到1.2MPa以上。所用水泥浆水灰比为0.6,水泥掺量19.7%,桩材料用量70kg/m,满足设计基本要求。小型构筑物段,完成软土路基处理后再进行反开挖施工;在管线位置,桩顶标高在管线底标高以下0.5m,搅拌桩实施完成后进行反开挖实施褥垫层、路基、路面。

(三) 处理效果

软土路基处理后,在场地布置取样孔,每1m取样一个判别加固效果。结果显示:经过排水固结后淤泥层的定名由淤泥变为了淤泥质土,其含水率和孔隙比分别减小了32%和34%,黏聚力、内摩擦角和压缩模量分别增长了32%,109%和42%,加固效果明显。其中内摩擦角增长达到了一倍以上,这说明排水后孔隙比减小,固体颗粒接触增加显著。对真空联合堆载预压处理后软土路基进行十字板原位试验检测,从淤泥层顶面以下1m处开始,间隔1m进行测试。处理后软土属中等灵敏性软土,软土路基应避免大幅扰动,特别是在路侧基坑作用下,应采取变形控制措施,防止过大变形的发生。

双向水泥搅拌桩进行钻芯法和单桩承载力能力检测,钻芯法检测结果表明芯样呈柱状,大部分完整,局部破碎,桩身完整性类别为II类,芯样试件抗压强度代表值为3.2~6.2MPa,达到设计要求。双向水泥土搅拌桩在最大试验荷载120KN作用下,压力稳定,各桩桩顶总沉降量范围为0.78~29.18mm,压力-位移曲线平缓,无陡降段,位移-时间对数曲线呈平缓规则排列,单桩承载力特征值达到设计要求。

四、结语

在我国长期的基建历程中,关于道路深层软基的基础技术已经积累了大量的经验,在技术上共研究出数个深层软土路基的处理方法大类,可以满足工程现场地质、工期、成本等综合要求,为城市道路工程建设保驾护航。但在具体技术选择与适用中,相关单位应当注意对工程进行全面的勘测和分析,并且认识到工程建设施工的客观规律,优化施工流程,加强工程质量监督与控制,从多个方面建立保障措施,降低软基处理的风险。

参考文献

- [1]张宏.分析公路施工中软土路基的施工技术处理[J].黑龙江交通科技,2020,43(04):30-31.
- [2]赵昌胜.软土路基勘察设计要点研究[J].黑龙江交通科技,2022,45(09):75-76.
- [3]齐兴强.探析公路工程软土路基的地质条件及优化控制措施运用[J].黑龙江交通科技,2019,42(06):51+53.