

市政道路设计中软基处理措施探究

文 / 李华栋 中国市政工程华北设计研究总院有限公司

摘要: 在市政道路设计中,软基处理是关键环节,一旦处理不当,将会对道路的使用寿命和行车安全造成严重影响。本文以软基处理作为研究对象,分析了市政道路软基问题的特点与危害,阐述了市政道路软基处理方案的设计思路,指明设计方向,约束设计过程,并详细阐述市政道路软基处理方案的设计方法,旨在提升市政道路路基结构的稳定性,推动市政道路的可持续发展,为人们提供更为便捷、安全的行车道路。

关键词: 市政道路; 工程设计; 软基处理措施

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.10.092

引言

近年来,我国大力建设市政道路工程,打造一体化城市交通路网体系,从而改善城市居民出行体验,促进城市发展和健全城市服务体系。然而,在市政道路设计层面,仍然存在软基处理设计缺位的问题,工程设计方案缺乏专项软基处理措施,导致市政道路现场施工过程和行车路况条件充满不确定性因素。为此,要重点完善市政道路软基处理设计内容,加强对市政道路软土地基问题的处理,改善市政道路的软土地基状况,从而提高市政道路的稳定性的。

一、市政道路软基问题概述

(一) 软土地基特点

软土地基泛指工程现场天然地基内分布的软弱土层,具备含水量高、压缩性大、不均匀性、强度低的鲜明特点,满足上述特点的土层,均定义为软土地基,包含淤泥质土、软黏土、冲填土、膨胀土、粉煤灰地基土、杂填土等种类。第一,含水量高。含水量超过20%,普遍保持在20%~30%含水量,含水量和地基承载能力密切相关,含水量越高,地基承载能力越差,在上部结构荷载、行车荷载作用下,地层变形沉降,带动道路结构变形开裂。第二,压缩性大。软基土质较软,孔隙比和压缩系数超出正常土层,极易出现沉降现象,沉降量、变形量较大,进而引起路面开裂、道路塌陷等质量问题。第三,不均匀性。软基各部位的土质性质、力学性质有着显著差异,在荷载作用下,逐渐出现不均匀沉降问题,局部沉降量超出平均沉降水准^[1]。第四,强度低。软基抗剪强度远低于正常土层,道路荷载普遍超出天然地基极限承载能力,必须进行加固处理,才能满足道路使用需求。

(二) 软基危害

从市政道路使用角度来看,软基问题造成极为严重和深远的危害,主要分为直接危害、间接危害两种形式,直接危害是以软基为主要诱因而引起的一系列质量病害,包括路面塌陷、路面开裂、路基失稳等,直接危及交通安全;间接危害则是因软基问题而恶化道路结构使用状态,不但会引起交通事故,还会缩短市政道路使用寿命。其中,路面塌陷是在天然地基抗剪强度偏低和压缩性较大的情况下,未采取加固处理措施,直接在天然

地基上铺筑路基路面结构,天然地基出现较为明显的沉降现象,总体沉降量超出警戒值后,致使路面整体塌陷或是局部塌陷。路面开裂根源在于软基具备不均匀沉降特性,软基局部沉降量高于周边部位,上部路面结构在不均匀沉降作用影响下,路面局部变形开裂,路面开裂位置贴近软基过度沉降位置,软基不均匀程度越严重,路面裂缝宽度越大、裂缝数量越多。路基失稳问题是地基结构承受远超自身极限承载能力的上部荷载,导致地基结构、路基结构和路面结构整体失去稳定性,而引起路面变形、道路塌陷在内的连锁问题。

二、市政道路软基处理方案的设计思路

(一) 因地制宜

软土地基种类繁多,包括杂填土地基、淤泥质土地基、冲填土地基等,各类软基都具备压缩性大、含水量高、不均匀性和强度低的共性特征,但土质特性与力学性质有本质不同。在早期市政道路工程中,软基处理方案具备盲从性,并未深入分析软土地基的水文地质条件和岩土物理力学性质,高度借鉴或全盘照搬同类工程设计方案,存在软基处理形式错误、设计参数与工艺参数不合理的问题,这也使得软基实际处理效果偏离设计预期。对此,设计人员必须遵循因地制宜原则,全面收集市政道路工程资料信息,以岩土勘察报告作为软基处理方案的设计依据,结合软基种类和水文地质条件,采取最为恰当的软基处理方法。例如,面对淤泥质土地基,软弱土层处于流塑-软塑状态,含水量远超其他软弱地基,有着天然孔隙率大、压缩性高、黏聚力小的特性,强夯法等软基处理方法并不适用,可采取水泥土搅拌桩或是PHC预应力管桩作为软基处理方式^[2]。其中,水泥土搅拌桩是使用水泥浆液作为固化剂,适当掺入早强剂、高效减水剂等外加剂,强力搅拌土体颗粒和注入水泥浆液,经过一系列化学反应后,形成特定形状、具备一定强度的固结体,增强地基承载能力和提高结构稳定系数。但在现场施工期间,水泥土搅拌桩更适用于片状工程、面状工程,道路工程表现为带状分布,需要在路基外侧打设3-4水泥土搅拌桩,软基处理范围有所扩大,产生高昂成本费用。PHC预应力管桩是采取先张法制成的预应力混凝土管桩,预应力管桩制作完毕、抵达工程现场

后,通过静力压桩方式,将管桩压入土层,压桩深度达标后,现场浇筑混凝土形成桩帽部位,铺设土工格栅与铺筑碎石垫层,预应力管桩和天然地基组成全新的复合地基结构。

(二) 明确软基处理要求

在市政道路工程中,软基处理是一项专业性较强的工程活动,要结合工程建设需求,提出明确软基处理要求,才能科学制定软基处理方案,确保实际处理效果完全满足预期要求。因此,设计人员必须明确规定软基处理要求,以此来确定软基处理设计框架,处理要求包含地基处理深度、地基处理范围、地基承载力与总沉降量三部分。对于地基处理深度,按照岩土勘察报告来掌握软弱土层分布情况,处理层厚度必须完全穿透软弱土层。对于地基处理范围,把路基宽度范围内分布的软弱土层作为加固对象,以路基横断面方向为起始点,延伸处理至路基坡线角外侧1m范围。对于地基承载力与总沉降量要求,根据上部道路结构承载力要求和基础结构沉降要求,确定软基处理标准,如要求加固处理后的复合地基承载力不低于120kPa,复合地基总体沉降量不得超过600mm,工后沉降量不得超过200mm^[3]。

(三) 控制成本费用

对于大面积分布软土地基的市政道路工程,软基处理活动将会产生巨大的工程量与高昂的成本费用,不论是软基处理形式错误,还是过度追求软基处理效果,都可能导致工程造价超出投资限额,致使市政道路工程无法创造出应有的经济效益。因此,设计人员必须重点关注经济问题,根据软基类型与处理要求,选择具备可行性的软基处理方法,制定软基处理方案,精准统计各套软基处理方案的预算费用,以造价成本相对低廉的软基处理方案作为最终设计方案。例如,在某市政道路工程,现场分布淤泥质土地基,初步制定水泥土搅拌桩复合地基、PHC预应力管桩两套处理方案。水泥土搅拌桩复合地基方案总计部署4170根水泥桩,总桩长为33360m,生石膏用量为36696kg,单个路段水泥桩处理长度为180m,直接工程费用为41.86元/m。PHC预应力管桩方案总计布置408根预应力管桩,总桩长为9384m,碎石垫层用量为1175m³,钢塑格栅用量为5876m²,桩帽上部铺着40cm厚度碎石垫层,桩顶垫层100mm和300mm位置设置钢塑格栅,单个路段PHC桩处理长度为80m,直接工程费用为117.57元/m。PHC预应力管桩的总体成本费用略高于水泥土搅拌桩,从经济性角度出发,该市政道路工程最终以水泥土搅拌桩复合地基作为淤泥质土软基的处理方式。

三、基于设计层面的市政道路软基处理措施

(一) 优选处理形式

近年来,软基处理技术得到迅速发展,陆续推出多项软基处理方法,主流方法包括强夯法、换填法、压密注浆法、水泥土搅拌桩法、PHC预应力管桩等。各项软基处理技术的施工难度系数、处理周期、处理效果和成

本费用有着显著区别,合理挑选软基处理形式,是软基处理设计活动的首要内容。软基处理形式选择环节,设计人员根据软基类型与水文地质条件,初步挑选多项满足软基处理要求、技术层面具备可行性的软基处理方法,再对各项方法的施工质量、经济性进行综合评估。以淤泥质土软基为例,适用方法包括水泥土搅拌桩、PHC预应力管桩、灌浆加固、土工加筋和抛石挤淤,水泥土搅拌桩、PHC预应力管桩两项方法的应用表现相对更为理想。其中,水泥土搅拌桩采取四搅两喷施工方法,有着工艺流程简单、易于操作的优势,但成桩质量不易控制,受到人为因素与自然因素影响,人为因素包括喷浆加水速率、施工场地防排水处理效果等,自然因素包括降雨量、空气湿度与环境温度。PHC预应力管桩采取静力压桩方式,成品管桩压入土层,有着机械化程度高、桩身质量可控、受力均匀的特点,施工效率略高于水泥土搅拌桩。根据施工质量与经济性评估结果来看,水泥土搅拌桩以成本低廉为核心优势,PHC预应力管桩以理想软基处理效果为核心优势,设计人员应根据市政道路工程软基处理侧重点,选择最终的软基处理形式,侧重于造价成本性时选取水泥土搅拌桩法,侧重于施工质量时选取PHC预应力管桩法^[4]。

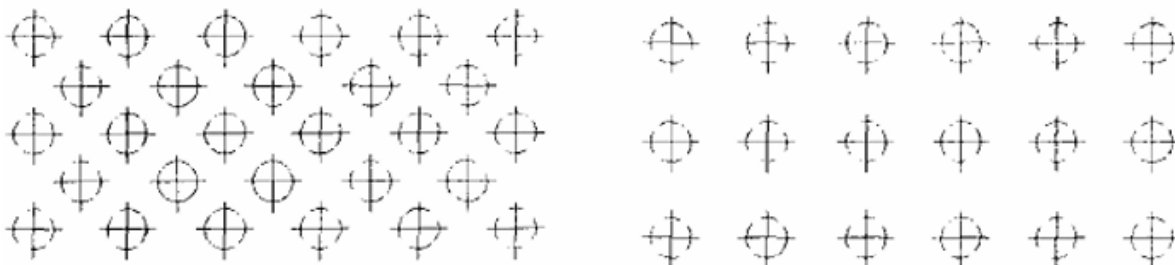
(二) 工艺参数设计

工艺参数是决定软基处理效果的核心因素,部分设计人员尚未熟练掌握各项软基处理技术的应用方法,所设定工艺参数缺乏针对性,没有完全贴合市政道路工程实际情况,致使处理后的地基承载能力不达标,地基工后沉降量和总体沉降量超出设计容许范围。因此,设计人员必须深入了解各项软基处理技术的作用机理,参考同类工程案例和现行规范文件,根据已知软基信息、现场水文地质条件和基础结构质量要求,逐一计算各项工艺参数的最优值。以强夯技术为例,适用于处理碎石土、杂填土、素填土、粉土等类型的软土地基,利用夯锤反复夯击地基土层,利用动力压密作用和动力固结作业,不断降低土层孔隙率,强制固结地基,使得地基介质排列组成全新稳定结构。强夯法工艺参数包含单击夯击能、夯点间距、夯锤直径等,设计方法如下。

第一,单击夯击能。按照 $E=Mgh$ 公式来计算最佳单击夯击能, E 为单击夯击能, M 为夯锤质量, g 为夯锤重力加速度, h 为软基加固深度。受到地基状态和土质条件等因素影响,单击夯击能计算结果存在误差,需要进行修正处理,修正系数控制在0.35-0.70。同时,单击夯击能和最后2击平均夯沉量有着密切联系,单击夯击能设定完毕后,即可确认停夯前2击平均夯沉量标准,如在单击夯击能低于400kN·m时,最后2击平均夯沉量应控制在5cm以内。第二,夯点间距。当前主要采取三角形或是正方形作为夯点布置方式,布置效果如图1所示。各遍夯点布置方案有所不同,普遍采取2遍强夯方式,首遍夯点布置间距保持为2.5-3.5倍夯锤直径,道路路基两侧交叉等距布设多处夯点,在首遍夯点间隔部位布

设第二遍夯点，相邻夯点距离不得小于 3m 和超出 12m。第三，夯锤直径。采取强夯置换处理方式的情况下，夯锤直径关乎强夯置换深度和置换体直径，需要提前制作多组模型箱，开展工艺试验，确定同时满足置换深度要

求、置换体直径要求时的夯锤直径。根据工艺试验情况来看，夯锤直径与有效置换深度呈反比例关系，夯锤直径与置换体直径呈现正比例关系，但置换体直径增加幅度较小^[5]。



(a) 三角形布置

(b) 正方形布置

图 1 夯点布置方案

(三) 三维仿真设计

在早期市政道路工程，设计人员主要根据已知工程信息展开联想，想象软基处理过程和最终处理效果，利用现行规范文件中的计算公式进行验证，并在工程现场组织开展试验段施工活动，论证软基处理方案是否具备可行性。设计规范内容没有完全贴合市政道路工程现场施工情况，计算结果并不能完全证明软基处理方案合理可行。试验段施工结果仅能证明单一工况下的软基处理效果，如果工况条件发生变化，将会导致软基施工过程和最终处理效果不受控制。对此，应以创新设计方法为问题解决思路，推动市政道路工程设计体系向三维仿真方向发展，推行数字孪生建设模式，以仿真模拟施工过程为设计思路。按照岩土勘察报告，建立软基结构数学模型，向模型内导入软基处理方案，依次推演正常工况、理想工况和最不利工况下的软基处理过程，从中挑选最为合理的软基处理方式，设定最优工艺参数，找出既定软基处理方案存在的不合理问题，针对性修改方案内容^[6]。

(四) 现场试验检测

软基处理活动具备长期性、技术含量高和影响因素多的特征，尽管采取三维仿真设计手段与提前开展工艺试验，仍无法保证实际软基处理效果完全满足设计要求。因此，在软基处理完毕后，必须开展现场试验，评定软基处理质量是否达标，分析软基处理效果不合格原因，在设计层面采取补救措施，如调整工艺参数、变更软基处理形式。例如，以水泥土搅拌桩作为软基处理形式时，采集多组芯样，芯样送往实验室开展无侧限抗压强度试验，取芯完毕后继续开展标准贯入试验，根据试验结果，判定水泥土搅拌桩的硬度状态、无侧限抗压强度是否满足设计要求。而在以强夯法为软基处理形式时，孔隙水压力消散后，开展标准贯入试验来检验强夯效果，要求最后 2 击下沉量差值不超过 5cm，以标准贯入击数作为检验指标，如果强夯效果不理想，则进行补夯处理，选择夯击方式与确定补夯次数。

(五) 工后监测

结合往期道路工程软基处理案例来看，软基经过加固处理后，在地下水侵蚀、其他工程施工扰动等因素干扰下，有概率出现局部塌陷问题，软基处理成果被破坏，实质上未能满足上部道路结构承载需求。因此，软基处理完毕后，需要持续性开展工后沉降作业，以基础沉降量作为监测内容，监测频率设定为每季度一次，沉降观测点间距值控制在 50m。如果监测报告显示基础沉降量超标、沉降速度过快，或是道路局部出现塌陷事故，立即执行先期制定的应急处置预案，紧急封闭路段，以注浆加固，局部换填修复作为处理手段。

结语

综上所述，软基处理是市政道路工程设计体系的重要环节，软基处理要求愈发严格，设计难度系数有所提升。设计人员必须高度关注软基处理问题，主动了解各项常见软基处理技术，理清软基处理设计思路，贯彻落实优选软基处理形式、工艺参数优化设计、三维仿真设计、现场试验检测四项处理措施，顺利取得理想的软基处理效果。

参考文献

[1] 曾昊. 南益高速公路软基处治方案设计与现场试验研究 [D]. 长沙理工大学, 2019.
 [2] 苏松裕. 吹填区市政道路软基处理设计分析 [J]. 中国高新科技, 2023, (21): 114-116.
 [3] 曾小刚. 市政道路软基处理方案设计及调整研究 [J]. 工程建设与设计, 2020, (17): 35-37.
 [4] 刘媛媛. 市政道路设计中软基处理措施的应用 [J]. 汽车画刊, 2024, (06): 152-154.
 [5] 闫静昌. 市政道路设计中软基处理措施的应用 [J]. 河南科技, 2021, 40(11): 114-116.
 [6] 吴仰宾. 广州南沙地区市政道路软基处理设计应用 [J]. 交通科技与管理, 2023, 4(16): 60-62.

作者简介：李华栋 (1983.9-), 男, 汉族, 辽宁朝阳, 高级工程师, 本科, 研究方向: 道路设计。