复杂地质条件下市政道路路基稳定性设计与加固技术

徐根杰
云南 腾冲 679100
DOI:10.61369/RSTD.2026030011

摘　　要： 伴随着我国城市化水平的不断提高以及城市框架的全面拉大，市政道路工程的建设规模越来越大，所处的地质环境也越来越复杂。由于存在软土地基、喀斯特地貌、高填深挖、地形剧烈起伏等诸多复杂的地质情况，所以路基稳定性设计和加固技术成了决定整个道路工程品质好坏、使用年限长短、城市交通运行安全与否的重要因素。本文以市政道路建设实际需求为出发点，从复杂地质条件下路基稳定性深层次的影响机理入手进行分析。主要对复杂地质下路基加固技术进行了阐述，主要包括复杂地形加固技术、特殊地基处理技术、差异沉降协同控制技术。根据路基填筑施工工艺及标准化质量控制体系的创建，本文给出了一种综合性的路基稳定性改善方案。经过研究发现，利用科学稳定的结构设计、细致的加固技术使用和全过程的标准化管理可以克服复杂的地质造成的工程病害，大大提高路基的承载能力和抗变形能力，给现代市政道路工程高质量发展提供坚实的理论基础和实践指导。

关 键 词： 市政道路；复杂地质；路基稳定性；加固技术；标准化体系

Stability Design and Reinforcement Technology for Municipal Road Subgrade Under Complex Geological Conditions

Xu Genjie
Tengchong, Yunnan 679100

Abstract: With the continuous improvement of urbanization level and the comprehensive expansion of urban framework in China, the construction scale of municipal road engineering is becoming larger and the geological environment is becoming more and more complex. Due to the complex geological conditions such as soft soil foundation, karst topography, high filling and deep excavation, and severe terrain undulations, the stability design and reinforcement technology of the roadbed have become important factors determining the quality of the entire road project, the length of its service life, and the safety of urban traffic operation. This article takes the actual needs of municipal road construction as the starting point and analyzes the deep-seated impact mechanism of roadbed stability under complex geological conditions. This article mainly elaborates on the reinforcement technology of roadbeds in complex geological conditions, including complex terrain reinforcement technology, special foundation treatment technology, and differential settlement collaborative control technology. Based on the construction process of roadbed filling and the establishment of a standardized quality control system, this article proposes a comprehensive improvement plan for roadbed stability. Through research, it has been found that the use of scientifically stable structural design, meticulous reinforcement techniques, and standardized management throughout the entire process can overcome engineering diseases caused by complex geology, greatly improve the bearing capacity and deformation resistance of roadbeds, and provide a solid theoretical foundation and practical guidance for the high-quality development of modern municipal road engineering.

Keywords: municipal roads; complex geology; roadbed stability; reinforcement technology; standardization system

引言

市政道路是城市生存和发展之基，市政道路建设水平直接体现城市现代化程度。近些年来，由于城市核心区的土地资源越来越紧张，新建的市政道路也开始往城市外围、地下空间以及地质情况比较恶劣的地方扩展。这些地区一般都存在深厚的淤泥质土、高压缩性的软粘土、湿陷性黄土或者地形起伏很大的山地丘陵地貌。在这些复杂的地质条件下进行路基施工，工程会遇到承载力不够、边坡失稳、不均匀沉降等种种严峻的考验。

Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

路基是市政道路的基础，稳定性是保证路面结构完好、实现车辆安全平稳行驶的前提。当路基在复杂的地质因素和车辆动荷载的共同作用下发生破坏的时候，不仅修复成本高，而且会对城市交通网络造成巨大的影响。因此，在复杂的地质条件之下对于市政道路路基稳定性的设计原则展开研究，对于路基加固技术进行系统的探究并加以创新，这已经成了当下交通及土木工程领域亟待解决的重要课题。本文会从多个角度出发，对复杂的地质条件下路基加固及质量控制进行全方位的分析。

一、复杂地质条件对市政道路路基稳定性的深层影响机制

（一）软土与水文地质的耦合效应

沿海城市或者内陆湖沼地区，市政道路常常要穿过大片的软土地基。软土一般具有天然含水量大、孔隙比大、抗剪强度低、流变性明显等特点。路基填土受自重应力和路面交通荷载的共同影响，软土层内孔隙水压力急剧增大，水分排出缓慢，造成地基长期的固结沉降。另外，复杂的水文地质条件如地下水位经常发生升降，都会造成软土有效应力状态的变化，很容易引起路基侧向挤出和剪切破坏，造成路面大面积开裂或者塌陷。

（二）复杂地形与特殊地貌对路基受力的干扰

地形的复杂性是造成路基失稳的又一重要因素。山地或者丘陵地区市政道路选线受地形标高严格限制，不可避免产生大量半填半挖路基、高陡边坡。地表横坡较陡时，填方路基沿原有地面的接触面很容易产生滑动软弱面。王玉美认为复杂地形条件下土石方调配难度大、大型机械进场及施工场地受到严重限制[1]。如果不能对地形特点采取有效的支挡、加固措施，路基很容易在暴雨侵蚀或者自重的作用下发生整体滑坡。

（三）高填方段与填挖交界处的应力集中与失稳

市政道路为满足城市管线敷设和道路纵坡平顺的要求，常常会遇到高填方路段。高填方路基由于填料体积大、自身沉降量大、对下卧地基的承载力要求高。填方和原状地面交界处或者软硬地层过渡段，由于两侧介质压缩模量相差很大，路基受力后会产生明显的应力集中现象。刚度突变是造成路基差异沉降的主要原因，最后会在路面结构上反映出来，产生严重的纵向或者横向裂缝。

二、市政道路路基稳定性设计的核心原则与受力分析

（一）稳定性设计的总体原则与前瞻性理念

对于复杂的地质环境，市政道路路基设计要冲破静态固化的思维定式，彻底实行地质勘察先行、综合治理并重、动态设计反馈的系统观念。设计准备阶段必须用钻探、原位测试等手段详细查明水文地质和岩土力学性质，确定地下水的埋藏情况和不良地层分布。由于市政道路地下有给排水、燃气等管网密集分布，设计既要保证路基主体结构的安全，又要对地基与管道之间的相互作用进行严密的分析，防止地基附加应力的扩散影响到原有地下设施。另外，现代工程要采用柔性、生态相融合的前瞻性设计思想，大量使用高强度土工合成材料来加强路基整体的抗拉韧性以及变形协调性，减少大体积混凝土等刚性支挡结构的使用，在保证稳定性的基础上符合绿色低碳的工程建设要求。

（二）路极限平衡理论与传统受力分析模型

科学严谨的计算分析是路基稳定设计的准则。对存在滑坡危险的复杂路段来说，极限平衡法是工程界使用最广的受力分析模型。该理论认为土体沿某一个潜在滑动面发生整体剪切破坏，用静力平衡条件求解土体抗滑力矩和下滑力矩之比，得到稳定性安全系数 F_s。

不同的土质有不同的滑动面形态假设。均质粘性土路基一般假定滑动面为连续圆弧形，但遇到有软弱夹层或者基岩倾斜的复杂地层时，滑动面就成不规则折线形。计算时需要考虑土体自重、地下水渗透动水压力、地表交通荷载等各种因素。为了保证道路绝对安全，受力分析必须考虑暴雨期水位骤升、地震等最不利的荷载组合工况，保证极端条件下安全系数满足规范要求，从力学本源上杜绝失稳隐患。

（三）动静荷载耦合效应与数值模拟分析技术

伴随着城市交通流量的增大，现代市政路基长时间处在填料自重等静态荷载和重型车辆高频动态荷载的相互作用之中。在复杂的地质环境中，特别是软土地区，高频的交通动荷载很容易造成软弱土体的疲劳软化，使软弱土体的抗剪强度急剧下降，并且无法恢复。

为了克服传统的二维平面简化计算的不足，目前路基设计中已经普遍采用有限元法等先进的数值模拟分析技术。依靠专业岩土计算软件，设计人员可以创建出一个高度仿真的、与实际地层分布完全一致的三维地质力学模型，并且给它赋予了精确的土体本构参数。不仅可以对施工阶段的应力场重分布、孔隙水压力消散过程进行动态模拟，而且可以准确预测运营期长期交通荷载作用下沉降演化的趋势。利用直观识别出来的路基内部塑性屈服区和应力集中点，数值模拟技术给后面精确施加抗滑桩、加筋材料等加固措施提供不可缺少的科学数据支持。

三、复杂地质下的路基加固技术

本部分为复杂地质条件下市政道路建设的主要部分。对地质缺陷千变万化的情况，应该采用准确高效持久的加固技术。以下从四个方面对路基加固具体的技术途径进行阐述。

（一）复杂地形条件下的路基加固与支护技术

在地形起伏大的地方，路基加固的重点是消除可能存在的滑动面，并给它提供强大的侧向支撑。王玉美对复杂地形下加固方案的选择做了详细的论述[1]。

第一种就是台阶式基底处理技术。当自然横坡陡于某个比例的时候，直接填筑很容易造成路基整体滑移。施工时原地面开挖成向内倾斜的台阶状，台阶宽度不小于2米。不但增大了填方和原地面之间摩擦面积，而且有效地阻止了地表水沿着接触面渗流，从力学机制上切断了滑动软弱面的产生。

 | Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

第二，抗滑桩和锚杆挡墙技术。极陡坡或者有古滑坡体的地方，重力式挡墙不能达到抗滑的目的。此时需要采用深埋抗滑桩，将钢筋混凝土桩体锚固在稳定的基岩上，依靠桩身的抗弯抗剪能力来抵抗上部土体的推力。配合预应力锚杆框架，将锚杆深插到稳定的岩层里，施加预应力，使松散的边坡土体牢固地“钉”在基岩上，形成一个高强度的复合受力体系[2]。

（二）特殊路基结构处理与新型加固工艺

市政道路建设中常遇到淤泥质土、湿陷性黄土、膨胀土等特殊不良地质，张世玺强调了掌握特殊路基施工关键技术的重要性[3]。

第一，深层软土的复合地基处理。对于厚度较大的淤泥质地层，广泛采用水泥土深层搅拌桩或旋喷桩技术。通过特制机械将水泥浆液注入深层土体并强制搅拌，使水泥与土发生一系列物理化学反应，形成具有较高强度的水泥土桩。这些桩体与桩间土共同承载上部荷载，显著降低了地基的压缩性并大幅提高了总承载力。

第二，动力固结与换填置换技术。针对浅层软弱土或湿陷性黄土，强夯法是一种经济高效的加固手段。利用几十吨重的夯锤从高处自由落下，产生强大的冲击波与动应力，迫使土体孔隙压缩、水分排出，从而消除土的湿陷性并提高密实度。当软土层较薄时，最彻底的方法是实施换填垫层法，将劣质土全部挖除，代之以级配良好的碎石、砂砾或灰土，分层压实形成高强度的持力层。

（三）差异沉降协同控制技术在高填方路段的应用

高填方段和软土路基交界处的差异沉降属于市政道路的重大病害。谭剑对高填方和软土路基的差异沉降进行协同控制的研究进行了详细的分析[4]。

第一，加筋土技术以及刚度平滑过渡。为了协调不同的地基变形，在填挖交界处或者桥头跳车频繁的路段，大量使用高强度土工格栅或者土工格室。土工格栅依靠网孔同填料间的咬合力、摩擦力来阻止土体发生侧向移动，把集中的垂直荷载分散到更广大的范围内，把局部剧烈沉降变成整体平缓沉降。

第二类为轻质路基填筑技术。在极软弱的地基上做高填方时，用气泡混合轻质土或者 EPS 超轻质材料代替常规土方。新型材料的密度只有普通土的三分之一甚至更低，可以从根本上大大减小路基的附加应力，直接减少下卧软土层的压缩变形量，达到对沉降源头的控制。

（四）地下水治理与防排水加固网络

在复杂的地质当中，水是造成路基病害的催化剂。加固技术要同防排水工程相结合。地下水位较高软土地区一般用塑料排水板联合堆载预压法。将塑料排水板打入软土深处，作为垂直排水通道，给路基表面加和设计荷载相同的土方堆载。超孔隙水压力的作用下，土中的水分沿着排水板迅速排出，使软土在施工期间提前完成了大部分的固结沉降。路基内设置盲沟、渗沟、防水土工布，构成一个立体的防排水系统，防止地下水长时间对路基造成破坏。

四、市政道路路基填筑工艺与标准化施工体系

（一）填筑材料的甄选与施工工艺的精细化控制

加固技术效果要依靠高标准的填筑工艺来达到。罗晶认为市政道路路基填筑施工工艺为保证路基稳定性提供物理基础。材料的选择要严格进行室内土工试验，选用 CBR 值高、塑性指数合适的填料。

施工过程中必须实行试验段先行制。通过现场试验准确测定填料最佳含水量范围、松铺厚度极限和压路机振动频率及碾压遍数。正式填筑时严格执行分层填筑、分层平整、分层碾压、分层检测的四步作业法。尤其在复杂的地形边缘地带以及管线沟槽回填区，大型压路机不能到达，需要小型夯实机械进行薄层强夯，保证压实度无死角达标，防止后期由于压实不均造成路基塑性变形。

（二）施工质量标准化体系的构建与动态监管

复杂地质路基工程不但是一个技术问题，也是一个管理问题。吕晓光等人对标准化体系建立对道路工程质量达标起到决定性的作用进行了详细的分析[5]。

创建起全过程闭环质量控制标准化的流程。地质复勘、材料进场、加固施工、竣工验收等各个环节都应该有详细的作业指导书和质量验收标准。严禁上道工序检验不合格就进入下道工序。

第二，用智能化动态监控技术。在路基施工全生命周期里，用物联网技术设置沉降观测标、深层水平位移计（测斜仪）、孔隙水压力计。实时采集路基施工过程中变形、受力等各项参数。设置预警阈值，当监测数据出现加速变形的迹象时，系统会立刻发出警报，促使施工方及时改变填筑速度或者启动应急加固方案，从而达成由被动的事后补救转向主动的事前预防的目的。

五、结论

复杂地质条件下的市政道路路基稳定性同工程建设成败息息相关，也对城市交通网络安全和长远发展起着决定性的作用。面对软土、高填方、陡峭地形等各种地质难题时，应该树立起综合治理的系统思想。本文通过对科学进行稳定性设计和受力分析前提作用的剖析，得出结论。采用王玉美对于复杂地形方案的优化[1]、张世玺对于特殊地基深浅层加固技术[3]、谭剑对于差异沉降协同控制手段[4]等理论，建立起来一个系统的路基加固技术体系。同时，根据罗晶所提出的精细化填筑工艺和吕晓光等人的质量标准化管理体系，给加固技术的全面实施赋予了管理支撑。因此，只有把前沿的加固理论、先进的施工工艺和严格的质控标准融合起来，才能破解复杂地质条件下路基病害难题，造就经得起历史检验的市政精品工程，为我国城市化高质量推进提供保障。

参考文献

[1] 王玉美 . 复杂地形条件下市政道路路基加固施工方案与工艺 [J]. 工程技术研究 , 2026, 11 (02) 99-101. DOI 10.19537/j.cnki.2096-2789.2026.02.033.

[2] 罗晶 . 市政道路路基填筑施工工艺研究 [C]// 上海筱虞文化传播有限公司 , 中国智慧工程研究会智能学习与创新研究工作委员会 . Proceedings of 2022 Shanghai Forum on Engineering Technology and New Materials(ETM2022)(VOL.2). 江西省地质局能源地质大队 , 2022 8-9. DOI 10.26914/c.cnkihy.2022.037472.

[3] 洪新锟 . 市政道路特殊路基处理技术及效果分析 [J]. 四川水泥 , 2025(12).

[4] 魏佳华 . 城市道路特殊路基挖除换填施工及应用效果研究 [J]. 交通科技与管理 , 2025(04).

[5] 赵刚 . 道路工程中特殊路基处置的质量控制探讨 [J]. 汽车周刊 , 2025(01).

Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.