

岩石力学特性与地铁施工段支护设计方法研究

刘德祎 412821198210046817

摘要：随着我国城市轨道交通建设规模持续扩大，地铁工程向大埋深、复杂地质条件区域延伸，岩石力学特性对施工段支护结构稳定性的影响愈发显著。本文从岩石强度、变形特性、裂隙发育特征三个维度分析地铁施工区域围岩的核心力学特性，明确不同等级围岩对支护结构的荷载作用机制，结合当前地铁暗挖施工的主流工艺，提出基于围岩分级动态调整的支护设计优化方法，并依托实际工程案例验证方法的合理性。研究表明，充分考量岩石原位力学特性的动态支护设计，能够在保障施工安全的前提下降低支护成本，为复杂地质条件下地铁施工段支护设计提供参考。**关键词：**岩石力学特性；地铁施工；支护设计；围岩分级

一、引言

我国城市轨道交通建设进入高速发展阶段，截至 2024 年初，全国已有超 50 个城市开通运营地铁线路，总里程突破 1 万公里。在地铁建设过程中，城区施工往往需要穿越岩层分布区域，尤其是山岭重丘区城市的地铁线路，围岩力学性质直接决定了施工安全与工程成本。传统支护设计多采用经验类比法，基于规范给定的围岩分级给出固定支护参数，未充分结合施工过程中揭露的原位岩石力学特性进行动态调整，容易出现支护不足引发坍塌风险，或是支护过度造成成本浪费的问题。因此，系统梳理岩石核心力学特性对支护结构的影响规律，优化地铁施工段支护设计方法，具有重要的理论与工程实践价值。

二、地铁施工区域岩石核心力学特性分析

岩石力学特性是围岩应力重分布与变形发展的核心影响因素，对地铁施工段支护设计起决定性作用，其中对支护设计影响最大的特性主要包括三个方面。

第一，岩石强度特性。岩石的单轴抗压强度、抗剪强度是衡量围岩承载能力的核心指标。对于坚硬完整岩石，单轴抗压强度通常超过 60MPa，自身承载能力较强，施工扰动后围岩能够依靠自身结构保持稳定，仅需要轻型支护结构即可控制变形。而对于软岩，单轴抗压强度普遍低于 30MPa，部分风化软岩的抗压强度甚至不足 5MPa，这类岩石在施工开挖后容易出现应力松弛，产生较大的塑性变形，若支护不及时或支护刚度不足，会引发围岩持续变形甚至垮落。

第二，岩石变形特性。岩石变形特性包括弹性变形与塑性变形两个部分，弹性变形能够在应力解除后自行恢复，对支护结构的长期稳定性影响较小，而塑性变形是不可恢复的变形，会持续对支护结构施加荷载。对于硬岩，变形以弹性变形为主，开挖完成后短时间内变形即可稳定，支护结构承受的荷载长期保持稳定。而对于泥岩、页岩等软岩，往往具有明显的蠕变特性，在恒定应力作用下变形会持续发展，部分软岩的蠕变变形可以持续数月甚至数年，会导致支护结构长期承受递增的荷载，若设计阶段未考虑蠕变变形的影响，容易出现支护结构开裂、变形超限等问题。

第三，岩石裂隙发育特性。天然岩层中普遍存在节理、裂隙、断层等结构面，结构面的发育密度、产状、充填情况直接改变了围岩的整体力学性质。当围岩裂隙发育稀疏、充填物少且结构面密闭时，围岩整体完整性好，力学性质接近完整岩石，承载能力较高。而当围岩裂隙密集发育，且被泥质、粉质软物质充填时，围岩整体强度会大幅降低，开挖后容易出现块体掉落，甚至引发大面积坍塌。

三、现有地铁施工段支护设计存在的问题

一方面，地质勘察获取的岩石力学参数存在偏差。地质勘察阶段通常采用钻孔取芯获取岩石试样，在试样运输与室内试验过程中，岩石的天然应力状态被破坏，裂隙会发生进一步扩展，导致室内试验获取的强度参数往往低于原位岩石的实际强度。此外，钻孔取芯的密度有限，对于地质条件复杂、岩性变化大的施工段，难以全面反映整个施工段的岩石力学特性，按照勘察参数设计的支护结构容易与实际工况不匹配。

另一方面，传统设计未实现动态调整。传统支护设计多为一次性设计，在施工前就确定了所有支护参数，施工过程中即使揭露的围岩力学性质与勘察结果存在差异，也很少对支护参数进行调整。当实际围岩强度高于勘察结果时，会造成支护过度，增加不必要的工程成本；当实际围岩强度低于勘察结果时，会出现支护不足，引发施工安全风险。

四、基于岩石力学特性的动态支护设计方法

第一，前期预设计阶段。结合地质勘察报告获取的岩石力学参数，按照现行规范对施工段围岩进行初步分级，根据分级结果确定初始支护参数，包括喷射混凝土厚度、锚杆长度与间距、钢拱架型号与间距等参数，作为施工初期的支护依据。在该阶段，需要针对不同可能出现的岩石力学特性预先制定支护参数调整方案，明确当围岩强度变化、裂隙发育情况变化时，参数调整的幅度与标准。

第二，施工过程动态识别阶段。在施工开挖过程中，通过现场地质素描、超前地质预报、原位测试等方法，获取开挖揭露的围岩实际岩石力学特性，包括实际岩石强度、裂隙发育密度与产状、地下水情况等参数，重新对围岩进行分级，对比预设计阶段的围岩分级结果，判断是否需要调整支护参数。

第三，施工变形监测反馈阶段。在支护结构施工完成后，持续监测围岩变形与支护结构受力情况，根据监测结果判断支护设计是否合理。如果围岩变形速率持续高于控制标准，说明支护参数不足，需要及时采取补强措施；如果围岩变形很快稳定，且变形量远低于控制标准，说明支护存在富余，后续施工段可以适当调整支护参数，降低工程成本。

五、工程案例验证

本文依托某地铁 1 号线暗挖施工段开展验证，该施工段全长 1280m，穿越中风化砂岩与泥岩互层区域，地质勘察阶段将该段围岩初步划分为Ⅳ级，按照传统设计方法，支护参数为：C25 喷射混凝土厚度 250mm， $\phi 25$ 锚杆长度 3.5m，间距 1000mm×1000mm，I20a 钢拱架间距 600mm。采用本文提出的动态支护设计方法，施工过程中对开挖揭露的围岩进行重新分级：对于中风化砂岩段，岩石单轴抗压强度达到 45~60MPa，裂隙发育稀疏，重新分级为Ⅲ级围岩，将支护参数调整为喷射混凝土厚度 200mm，钢拱架间距调整为 1000mm，锚杆长度调整为 3.0m；对于泥岩富集段，岩石单轴抗压强度仅 10~18MPa，裂隙发育且存在地下水软化问题，重新分级为Ⅴ级围岩，将支护参数调整为喷射混凝土厚度 300mm，钢拱架间距调整为 500mm，增加超前小导管注浆加固措施。

六、结论

岩石力学特性是地铁施工段支护设计的核心依据，传统基于静态勘察参数的支护设计方法难以适配复杂多变的围岩条件。本文从岩石强度、变形、裂隙三个维度分析了岩石力学特性对支护设计的影响，提出了“预设计—动态识别—监测反馈”的动态支护设计方法，工程案例验证结果表明，该方法能够根据施工过程中揭露的实际岩石力学特性调整支护参数，在保障施工安全的前提下有效降低工程成本，适合在复杂地质条件下的地铁工程中推广应用。

参考文献

- [1] 李天斌, 王兰生. 高地应力区软岩隧道大变形机理及控制技术研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(增 1): 1635-1640.

- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50108-2008 地下工程防水技术规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2008.
- [3] 何川, 张恒, 邓勇军. 城市地铁复杂地质条件施工技术研究进展[J]. 土木工程学报, 2018, 51(9): 101-114.