

# 锚杆在卵石层中的应用

## ——基于水泥用量控制的技术优化

李艳军 郭弼超 张凯 宋健 张俊敏

北京京能地质工程有限公司 北京 102300

**摘要:** 随着城市地下空间开发、基坑支护及边坡加固工程向复杂地层拓展,卵石层因颗粒粒径大(20~200mm)、孔隙发育(孔隙率25%~40%)、胶结性差等工程特性,成为锚杆支护施工的重难点场景。水泥浆作为锚杆锚固体系的核心胶结材料,其用量直接决定锚固力传递效率、界面粘结强度与工程经济性——用量不足会导致浆体无法填满卵石孔隙,引发锚固失效;用量过量则增加成本,且浆体收缩变形增大,易产生微裂缝削弱锚固效果。结合卵石层地质勘察数据,系统分析水泥用量对锚固性能的影响机制,提出基于孔隙率、锚固长度、注浆方式的用量计算方法,研究可为卵石层锚杆支护工程的水泥用量优化提供理论依据与实践参考。

**关键词:** 锚杆; 卵石层; 水泥用量; 锚固性能; 水灰比; 界面粘结; 注浆工艺

### 引言

锚杆支护技术因成本低、施工便捷、对地层扰动小等优势,已广泛应用于城市地铁基坑、高层建筑地基加固、边坡防护等工程。据《中国岩土工程发展报告2023》统计,我国每年约有30%的地下工程涉及卵石层支护,而卵石层作为典型松散破碎地层,颗粒间缺乏有效胶结,孔隙率高达25%~40%,施工中易出现水泥浆流失、锚固界面粘结薄弱等问题,导致锚固质量波动较大。

水泥浆是锚杆与卵石层间的“粘结纽带”,其用量控制是锚固工程的核心。目前,国内外相关研究多集中于黏性土、砂土等均质地层,开展卵石层锚杆水泥用量控制研究,对提升锚固质量、降低成本具有重要意义。本文从卵石层地质特性出发,结合理论分析、室内试验与工程实践,系统探讨水泥用量的计算方法与技术优化路径。

### 作者简介:

1. 李艳军(1979.10--),男,汉族,山西兴县人,职务/职称:高级工程师,学历:本科,研究方向:施工技术;
2. 张凯(1994.05--),男,汉族,河南滑县人,职务/职称:助理工程师,学历:方向本科,研究:水文、土木;
3. 郭弼超(1995.07--),男,汉族,内蒙古自治区巴彦淖尔市五原县隆兴昌镇人,职务/职称:助理工程师,学历:大学本科,研究方向:地质工程;
4. 宋健(1996.08--),男,汉族,职务/职称:技术员/助理工程师,学历:本科,研究方向:岩土。

### 一、卵石层地质特性对锚杆水泥用量的影响机制

#### (一) 卵石层的工程特性

卵石层多由第四纪冲洪积形成,通常含粒径>20mm的卵石占比>50%、中粗砂填充料及少量黏性土,其工程特性对水泥用量需求影响显著,具体表现为:

**颗粒级配离散:** 卵石粒径差异大20~200mm,其中20~50mm颗粒占比约40%、50~100mm占30%、100~200mm占20%,剩余10%为细砂及黏性土;颗粒间形成5~50mm的不规则孔隙,需足够水泥浆填充以形成连续锚固体,若孔隙未填满,锚固力传递会出现“断点”。

**渗透性强:** 卵石层渗透系数达 $1 \times 10^{-2} \sim 1 \times 10^{-1} \text{cm/s}$ 通过变水头试验测定,远高于黏性土 $1 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-4} \text{cm/s}$ ;水泥浆若未及时凝固,易沿孔隙渗透流失,导致有效胶结体体积减少,尤其在裂隙发育区段,流失率可达20%~30%。

**抗剪强度低:** 颗粒间以点接触为主,天然状态下内摩擦角 $30^\circ \sim 40^\circ$ 直剪试验实测值,黏聚力接近0( $< 5 \text{kPa}$ ),无法提供足够抗拔力,需依赖水泥浆胶结卵石颗粒,形成“锚杆-浆体-卵石”一体化承载体系。

#### (二) 水泥用量对锚固性能的影响机制

锚杆锚固力通过“水泥浆体与卵石层界面粘结力”“浆体自身强度”“浆体与锚杆杆体握裹力”三路径传递,水泥用量对三者的影响具有显著差异:

##### 1. 界面粘结强度

界面粘结强度是锚固力传递的核心,与水泥浆体在

卵石表面的覆盖度直接相关。通过室内拉拔试验发现：

用量不足35kg/m时：仅60%~70%卵石颗粒被浆体包裹，界面存在“接触空隙”，拉拔时易发生局部剪切破坏，界面粘结强度仅0.5~0.6MPa；

用量适中45~55kg/m时：浆体填满孔隙并在卵石表面形成5~10mm厚的胶结层，界面粘结强度达0.8~1.2MPa，满足JGJ 120-2012《建筑基坑支护技术规程》中卵石层0.6~0.8MPa的设计要求；

用量过量65kg/m时：浆体凝固过程中产生2%~3%的体积收缩，收缩应力导致界面出现微裂缝宽度0.1~0.2mm，粘结强度反而下降10%~15%，降至0.9~1.0MPa。

### 2. 浆体自身强度

水泥浆体的抗压强度随用量增加呈“增长-平缓-下降”趋势。在水灰比固定为0.5的条件下，室内试验数据显示：

用量35kg/m时：浆体28d抗压强度15MPa，无法承受卵石颗粒传递的集中应力，易发生浆体压溃；

用量35~55kg/m时：强度随用量线性增长，55kg/m时达30MPa，能有效抵抗剪切与压应力；

用量>55kg/m时：浆体内部水泥颗粒聚集，骨料（若添加）与水泥比例失衡，内部孔隙率增加从3%升至5%，强度增长趋于平缓，65kg/m时强度降至28MPa，且收缩开裂风险显著提升。

### 3. 浆体流失控制

卵石层高渗透性易导致“跑浆”，水泥用量需兼顾“填充孔隙”与“抵抗流失”。通过不同渗透系数下的流失试验表1可知：

表1 不同渗透系数与水泥用量的浆体流失率对比

渗透系数 (cm/s)	水泥用量 (kg/m)	流失率 (%)	有效胶结体体积 (m <sup>3</sup> /m)
1 × 10 <sup>-2</sup>	35	8	0.018
1 × 10 <sup>-2</sup>	50	5	0.022
1 × 10 <sup>-1</sup>	35	30	0.012
1 × 10 <sup>-1</sup>	50	10	0.019

可见，渗透系数越高，流失率越大；当用量低于40kg/m时，即使渗透系数较低1 × 10<sup>-2</sup>cm/s，流失后有效胶结体也无法满足需求；通过合理增加用量，可将流失率控制在10%以内，但需结合注浆压力0.2~0.4MPa，避免过量流失导致成本失控。

## 三、卵石层锚杆水泥用量的计算方法

### (一) 基础参数确定

水泥用量计算需先通过地质勘察与室内试验获取3

类关键参数，确保计算准确性：

孔隙率(n)：采用灌水法测定（取直径10cm、高20cm的原状卵石样，加水至饱和，记录排水量V<sub>w</sub>，孔隙率n=V<sub>w</sub>/试样总体积），需选取3~5个勘察点取平均值，卵石层孔隙率通常为25%~40%；

水泥浆体收缩率(β)：普通硅酸盐水泥浆凝固后体积收缩率为2%~3%通过量筒法测定，记录浆体初凝前后体积变化，需在用量计算中预留收缩余量，避免收缩后孔隙暴露。

### (二) 水泥用量计算公式

基于“孔隙填充需求”与“浆体强度要求”，水泥用量Q，单位：kg/m计算公式推导如下：

计算单位长度锚杆孔的总需浆体积：总需浆体积=卵石层孔隙体积(V<sub>p</sub>) + 锚杆杆体与孔壁环形体积(V<sub>s</sub>) + 收缩补偿体积(V<sub>p</sub>+V<sub>s</sub>) × β；

### (三) 修正系数调整

考虑卵石层渗透性、施工工艺差异，需对基础用量进行修正，修正系数选取依据如下：

渗透性修正系数k<sub>1</sub>：渗透系数>1 × 10<sup>-1</sup>cm/s时（高渗透区段），k<sub>1</sub>=1.1~1.2（补偿流失）；渗透系数<1 × 10<sup>-2</sup>cm/s时（低渗透区段），k<sub>1</sub>=0.9~1.0（减少过量风险）；

注浆方式修正系数(k<sub>2</sub>)：二次注浆（先填大孔隙再补浆）可减少12%~15%的浆体流失，k<sub>2</sub>=0.95；一次注浆流失率较高，k<sub>2</sub>=1.05；

## 四、基于水泥用量控制的技术优化

### (一) 水泥浆配合比优化

配合比优化是“控用量、保性能”的关键，需平衡流动性、强度与收缩性，卵石层推荐配合比参数如下：

水灰比ω：推荐0.45~0.55。水灰比<0.45时，浆体坍落度<180mm，流动性差，无法渗透至5~10mm的小孔隙；水灰比>0.55时，浆体28d强度<25MPa，且收缩率>3%，易开裂。室内试验显示，水灰比0.5时，浆体坍落度200mm、28d强度30MPa，为最优平衡点；

外加剂添加：

减水剂：选用聚羧酸系高效减水剂，掺量0.5%~1%占水泥质量，可在相同水灰比下提升坍落度30~50mm，或在相同流动性下减少水泥用量5%~8%；

膨胀剂：选用钙矾石类膨胀剂，掺量1%~2%，可补偿浆体收缩，将收缩率从3%降至1%以内，避免界面开裂；

骨料添加：孔隙率>35%的卵石层，可掺入粒径

2~5mm的细砂(颗粒占比 $\geq 90\%$ ),掺量30%~50%占水泥质量,既减少水泥用量每掺10%细砂减少3%水泥,又提高浆体抗裂性细砂填充水泥颗粒间隙,降低内部孔隙率。

## (二) 施工过程控制

### 1. 分段注浆与用量调整

根据卵石层孔隙率分布差异,采用“分段注浆、按需调整”策略,区段划分与用量控制依据地质勘察报告:

上段地表下0~3m:多含黏性土10%~15%,孔隙率25%~30%,水泥用量按计算值的90%~95%控制,避免黏性土阻碍浆体流动导致“超注”;

中段3~8m:黏性土含量 $< 5\%$ ,孔隙率30%~35%,按计算值控制,确保浆体均匀填充;

下段(8m以下):易存在卵石密集区或裂隙(孔隙率35%~40%),用量提高10%~15%(如计算值50kg/m,实际用55~57.5kg/m),并采用低压慢注(0.2~0.4MPa),延长浆体停留时间,减少流失。

### 2. 注浆压力与用量协同控制

注浆压力与用量存在耦合关系,需分阶段动态调整,具体控制流程:

初始阶段:采用低压注浆,观察流量计读数,若流量稳定,说明浆体填充正常,按设计用量注浆;

压力骤降阶段:若压力从0.2MPa骤降至0.05MPa以下,流量增至80L/min以上,判断为“跑浆”,需立即暂停注浆,采取2项措施:①间隔注浆;②添加速凝剂,恢复注浆后适当增加用量,直至压力回升至0.2MPa;

压力饱和阶段:当压力升至0.4~0.6MPa且稳定5~10min,流量计读数降至10L/min以下,表明浆体已填满孔隙,停止注浆,避免过量。

### 3. 质量检测与用量反馈

施工过程中需通过3类检测验证用量合理性,形成

“检测-反馈-调整”闭环:

注浆量监测:采用电磁流量计实时记录实际注浆量,与计算用量对比,偏差 $> 10\%$ 时分析原因,调整后续区段用量;

无损检测:每施工10根锚杆,采用超声波检测仪(频率20~50kHz)检测锚固体完整性,若波速 $< 3000\text{m/s}$ (正常波速3200~3500m/s),判断为浆体不连续,相邻锚杆施工时该区域用量提高5%~10%;

拉拔试验:每30根锚杆取1根进行现场拉拔试验(按JGJ 120-2012规范[6]),若锚固力未达设计值,优先排查水泥用量(如锚固力仅达设计90%,分析是否用量不足导致浆体填充不充分),调整后续施工用量。

## 结论

卵石层锚杆水泥用量需平衡“孔隙填充、浆体强度、流失控制”三者需求,最优用量范围为45~55kg/m(对应水灰比0.45~0.55),此范围内界面粘结强度0.8~1.2MPa,浆体28d抗压强度25~30MPa,可满足设计要求;用量不足( $< 45\text{kg/m}$ )易导致锚固失效,过量( $> 55\text{kg/m}$ )则增加成本与收缩开裂风险。

工程实践表明,配合比优化(减水剂+膨胀剂+细砂)、分段注浆与压力协同控制,可在控用量的同时保障锚固性能:掺入0.5%~1%减水剂减少5%~8%水泥用量,分段注浆使用量适配孔隙率分布,压力动态调整降低“跑浆”风险。

## 参考文献

- [1]张传庆.卵石地层锚杆支护技术研究与应用[J].岩土工程学报,2020,42(S1):189-192.
- [2]李术才,张庆松,刘人太.复杂地层注浆加固理论与技术[M].北京:科学出版社,2019:156-168.