 DOI: https://doi.org/10.12349/edc.v8i10.12079

Research on the Optimization and Construction Techniques of High-Altitude Slope Support Structures

Zhi Wang Shaojian Wang Lei Shen Yu Pan Jian Wang

Yunnan Construction Investment Second Construction Co., Ltd., Kunming, Yunnan, 650000, China

Abstract

For the 3900~4300m high-altitude slope support project at the Markang Dangba lithium spodumene mine, the original "anti-slide pile with post-installed rebar wall" scheme had issues like main rebar easily getting damaged during rebar installation, uncontrolled pull-out force at low temperatures, and insufficient durability at connection points. Considering the characteristics of high-altitude construction and through process testing and numerical simulation, an optimized "lower pile top height with integrated column-wall" method was proposed: the pile top is lowered to the base level of the wall, and an integrated column-wall replaces the post-installed rebar panel. The pile rebar and column rebar are mechanically connected using threaded couplers, and the construction proceeds in 3-meter sections in sequence. Engineering verification shows that this plan completely avoids the quality risks of post-installed rebar, has an overall safety factor of 1.38, a maximum displacement of only 12mm during construction, shortens the construction period by 22%, and reduces costs by 15%, providing a technical solution for high-altitude mine slope support.

Keywords

anti-slip piles; post-installed rebar defects; column-slab walls; conventional construction; mechanical connection

高海拔边坡支护结构优化与施工技术研究

王治 王绍健 申磊 潘宇 王健

云南建投第二建设有限公司，云南昆明 650000

摘要

针对马尔康党坝锂辉石矿3900~4300m高海拔边坡支护工程原“抗滑桩+后植筋桩板墙”方案存在的植筋易损伤主筋、低温下抗拔力失控、节点耐久性不足等缺陷，结合高海拔施工特点，通过工艺试验和数值模拟，提出"桩顶降标高+柱板墙顺做法"优化方案：将桩顶降至墙底标高，以整体式柱板墙替代后植筋挂板，桩筋与柱筋采用滚轧直螺纹套筒机械连接，按3m一模分阶顺作施工。工程验证表明，该方案彻底规避后植筋质量风险，整体稳定安全系数1.38，施工期最大位移仅12mm，工期缩短22%，造价降低15%，为高海拔矿山边坡支护提供了技术路径。

关键词

抗滑桩；后植筋缺陷；柱板墙；顺做法施工；机械连接

1 引言

随着新能源产业发展和锂矿开发力度加大，川西高原相继建设了一批大型矿山采选项目。高海拔特殊地质气候条件给工程带来诸多挑战，边坡支护作为矿山先行工程和安全屏障，方案选择直接决定工程成败。马尔康党坝锂辉石矿500万t/a采选项目选矿厂位于四川阿坝马尔康市党坝乡，海拔3900~4300m，属高海拔寒冷地区，具有低气压、低氧、低温、大温差、强紫外线、冻融频繁等特征，混凝土28天标养强度仅为设计值55%~82%，质量控制难度远大于平原。

桩板墙作为高陡边坡支护中技术成熟、应用广泛的支挡结构形式，具有抗滑能力强、支挡高度大、对边坡原生岩土体扰动小等优点，在矿山、公路、铁路等工程领域得到了大量应用。传统桩板墙通常采用"先施工抗滑桩、后桩间挂板"的工艺，其中挂板与桩身的连接多采用后植筋技术。然而大量工程实践表明，后植筋技术在实际应用中存在诸多质量隐患：钻孔过程中易损伤桩身主筋，植筋抗拔力受施工工艺、胶体性能、环境温度等因素影响较大，尤其是在高海拔低温环境下，植筋胶固化速度慢、强度增长不稳定，质量控制难度极大，成为制约高海拔边坡支护工程质量的关键技术瓶颈。

本文以马尔康党坝锂辉石矿选矿厂边坡支护工程为背景，针对原设计方案存在的技术缺陷，结合高海拔地区特殊施工条件，系统开展结构方案优化研究，提出了桩顶降标高、上部采用柱板墙顺做法施工的新

【作者简介】王治（1985-），男，中国云南禄丰人，本科，高级工程师，从事建筑工程，施工技术研究。

型支护技术，并从结构受力、施工工艺、质量安全、进度造价等多维度进行对比分析，通过现场工程应用验证了方案的技术可行性和经济合理性，可为同类高海拔边坡工程提供参考。

2 原设计方案及技术缺陷

2.1 工程概况与地质条件

选矿厂边坡沿地形展布总长约1000m，分四个施工段：备件仓库区、3912m平台+3899m填方区、药剂车间+高位水池区、粗矿仓+驱动站区，其中粗矿仓为关键线路。边坡地层为第四系坡残积粉质黏土、碎石土（厚3~8m），下伏三叠系变质砂岩、板岩，节理发育，岩体质量Ⅳ~Ⅴ级。地震烈度Ⅶ度，加速度0.15g，安全等级一级。

原设计采用C30钢筋混凝土抗滑桩，桩径1.5m，桩长18~28m，桩间距4.0m，桩身主筋采用HRB400级直径25mm钢筋，沿桩周均匀布置共24根，保护层厚度50mm；抗滑桩施工完成并达到100%设计强度后，采用后植筋技术在桩身外侧植入直径16mm连接钢筋，植筋孔直径22mm，钻孔深度700mm，注入环氧类植筋胶后植入钢筋，待胶体固化并经拉拔试验合格后，现浇300mm厚C30钢筋混凝土挡土板，形成桩板墙支挡结构。

2.2 后植筋现场工艺试验

为验证后植筋工艺适用性，在试验段进行了30根植筋工艺试验，环境温度3~8℃。结果：固化72h后拉拔仅17根达标，合格率56.7%；不合格中8根为胶体-混凝土粘结破坏、3根为胶体-钢筋界面破坏、2根钻到主筋无法达设计孔深。延长至7天后合格率升至73.3%，仍达不到95%规范要求，胶体后期强度增长缓慢，质量风险大。

2.3 后植筋技术质量风险系统分析

结合工艺试验结果和同类工程经验，原后植筋桩板墙方案存在以下几方面难以解决的技术问题：

（1）桩身主筋损伤风险。抗滑桩配筋率较高，主筋沿桩身周边密集布置，保护层厚度仅50mm。后植筋钻孔直径22mm，钻孔深度700mm，即使施工前采用钢筋扫描仪进行定位，受现场操作条件限制、仪器测量精度影响以及桩身钢筋实际位置偏差，仍有较大概率钻断或损伤桩身主筋，一旦损伤主筋将严重削弱抗滑桩抗弯承载力，给结构留下永久性安全隐患。

（2）低温环境下植筋质量失控。植筋抗拔力受多重因素影响，质量离散性大。特别是在本工程高海拔低温环境下，常规环氧类植筋胶在5℃以下固化速度极慢，工艺试验证明72小时强度仅能达到设计值的40%左右，即使延长养护时间，长期强度仍不稳定，无法保证结构长期可靠性。

（3）施工工序复杂、质量验收困难。后植筋施工需经过8道工序，高海拔地区施工人员劳动效率低，任何一道工序失控都会导致植筋失效，且属于隐蔽工程，后期质量问题难以发现和修复。

（4）节点耐久性不足。后植筋节点处新旧混凝土结合面易形成收缩裂缝，植筋胶长期在强紫外线、冻融循环作用下易老化，钢筋易受地下水锈蚀，全寿命周期维护成本高。采用LEC作业条件危险性评价法评估，后植筋工序风险值D=360，属于重大风险等级，必须进行方案优化。

3 柱板墙顺做法优化方案

3.1 优化思路与结构体系

针对原方案的技术缺陷，优化设计遵循"安全可靠、质量可控、工艺简便、经济合理"的原则，核心优化思路是：将后植筋的“二次连接”改为“机械连接整体受力”，将“桩外外挂板”改为“桩上立柱板”，从根本构造上规避后植筋工艺带来的质量风险。具体措施为：通过边坡稳定性验算，适当缩短抗滑桩悬臂段长度，将桩顶标高降至原设计挡墙墙底位置，抗滑桩顶部作为上部钢筋混凝土框柱的基础，桩身主筋直接伸出桩顶，采用滚轧直螺纹套筒与上部框柱主筋一一对应连接，框柱之间设置钢筋混凝土挡土板，与框柱整体浇筑，形成整体式柱板墙结构，采用从下至上分模顺作施工工艺。

优化后结构上下协同：下部抗滑桩嵌固于稳定地层（桩径、间距、锚固段同原设计），承担主要滑坡推力，起“固脚”作用；上部柱板墙为整体式框架，每桩对应一根800mm×800mm框柱，柱间设300mm厚挡土板，每3m设一道横系梁增强整体性，墙高6~12m，承担上部土压力并传至抗滑桩，形成“强桩弱柱、固脚强腰”体系。MIDAS GTS NX验算整体稳定安全系数1.38（>1.35规范值），桩顶最大位移18mm（<30mm控制值），安全储备充足。

3.2 排水系统设计

边坡水是影响支挡结构安全的重要因素，优化方案进一步完善了排水系统设计：在柱板墙墙身沿高度每2m设置一排直径100mmPVC泄水孔，水平间距2m，泄水孔向外坡度5%，墙背设置300mm厚级配碎石反滤层，防止土体流失；在边坡顶部和各级平台设置截水沟，将地表水引排至边坡外；墙脚设置排水沟，将坡体渗水和地表水有序排出，有效降低水压力对支挡结构的不利影响。

3.3 顺做法施工工艺

柱板墙采用"开挖一段、支护一段、封闭一段"的

信息化施工，每模3m高，主要流程为：

① 施工下部抗滑桩，桩顶预留机械连接钢筋，丝头采用保护套防护；

② 桩身强度达80%后，分层开挖桩前土体至桩顶，施工C15混凝土垫层并精确放样；

③ 采用直螺纹套筒接长柱筋，安装第一模柱、板模板，验收后浇筑混凝土；

④ 混凝土强度达70%后拆模，开挖下一层3m桩后土体，安装第二模浇筑；

⑤ 自下而上分模施工至墙顶，最后施工压顶梁、反滤层与排水系统。

该工艺实现了开挖与支护紧密衔接，最大限度缩短边坡临空时间，3m模高既符合模板安全要求，又与高原混凝土养护周期匹配，避免了一次浇筑过高产生的质量问题。

4 关键施工技术与质量控制

4.1 钢筋机械连接技术

上下钢筋采用滚轧直螺纹套筒连接，彻底替代后植筋。桩顶预留钢筋调直除锈后，用专用滚丝机加工6f级螺纹，逐个检查后戴保护帽；45号钢标准套筒以230N·m力矩拧紧，两丝头在套筒中央顶紧并做标记。接头每500个为一批，每批抽3个做单向拉伸，全部达I级接头要求。质量直观可检，接头强度不低于母材，从根本上保证传力可靠。

4.2 高海拔混凝土质量控制

针对高原特殊气候，混凝土施工采取三项核心措施：

（1）配合比优化：采用P·O42.5R早强水泥，掺4%早强防冻剂与高效引气减水剂，水胶比≦0.45，入模温度≧5℃，确保-5℃环境下3天强度达设计值50%、7天达80%。

（2）保温养护：浇筑后覆盖塑料薄膜+双层保温被，模板外贴50mm橡塑保温板蓄热养护，每4小时测温，严格控制内外温差和降温速率；低于-10℃时采用暖棚法施工。

（3）严格拆模：以同条件养护试块强度为准，柱侧模70%强度、板底模100%强度方可拆模，防止混凝土表面损伤和温度裂缝。

4.3 施工监测

施工期间建立自动化监测体系，沿边坡每20m设一监测断面，布置桩顶位移、深层水平位移、土压力、地下水位监测点，施工期每日监测，变形速率超过3mm/d时立即停工处置。实测数据表明，施工期间边坡最大水平位移仅12mm，远小于30mm允许值，边坡始终处于稳定状态。

5 技术经济综合对比

以100m长、平均支挡高度10m边坡为基准，两方案对比结果如下：

安全性：原方案后植筋失效可能引发挡土板脱落、桩间土流失甚至失稳，属重大风险源；优化方案机械连接整体受力，质量100%可检可控，顺做法开挖支护同步，风险值D=72，降为一般风险。

质量：原方案一次验收合格率仅56.7%，需大量返工，耐久性差；优化方案整体浇筑，一次验收率≧98%，整体性和抗冻融、抗老化性能显著提升。

进度：原方案需桩身100%强度才可植筋，植筋后需72h以上固化，单段约90天；优化方案80%强度即可开始上部施工，各工序流水作业，单段约70天，缩短22%。

造价：原方案综合单价约1.85万元/延米、总185万元；优化方案约1.57万元/延米、总157万元，每延米节约2800元，降低15%，全边坡累计节约约280万元。

6 工程应用与结论

"桩顶降标高+柱板墙顺做法"优化方案已在党坝锂辉石矿选矿厂边坡全面应用，累计完成抗滑桩248根，柱板墙支护长度986m。施工过程安全顺利，未发生任何质量安全事故，钢筋机械连接接头抽检合格率100%，混凝土强度全部达到设计要求，经过一个冻融期的观测，边坡变形稳定，墙面未出现结构性裂缝，得到了建设单位、设计单位和监理单位的一致好评。

通过本工程的研究与实践，得出以下主要结论：

（1）后植筋桩板墙方案存在桩身主筋易损伤、低温环境下抗拔力不足、质量离散性大等固有技术缺陷，工艺试验证明在3~8℃环境下植筋72小时拉拔合格率仅56.7%，不适用于高海拔寒冷地区边坡支护工程。

（2）"桩顶降标高+柱板墙顺做法"优化方案通过钢筋机械连接实现上下结构整体受力，从构造上彻底规避了后植筋质量风险，结构受力合理，整体稳定安全系数达1.38，安全储备充足。

（3）3m一模分阶顺作施工工艺实现了开挖与支护同步，边坡临空时间短，施工期最大位移仅12mm，工序简便，质量可控，与高海拔地区混凝土施工特点高度适配。

（4）技术经济对比表明，优化方案实现了安全、质量、进度、效益多赢目标：风险等级从重大降为一般，一次验收率从56.7%提升至98%，工期缩短22%，

造价降低15%，可为川西高原及类似高海拔地区矿山、公路边坡支护工程提供技术借鉴，具有广阔的推广应用前景。

参考文献

[1] GB 50330-2013, 建筑边坡工程技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.

[2] JGJ 107-2016, 钢筋机械连接技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.

[3] 李海光, 周勇. 桩板墙不同类型挂板的技术经济比较[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2025, 36(3):78-85.

[4] 张伟, 李明. 高海拔地区建筑施工技术难点及应对策略[J]. 建筑技术, 2025, 56(12):1456-1460.

[5] 王建国, 刘畅. 抗滑桩结构损伤及补强技术应用研究进展[J]. 岩土工程技术, 2026, 40(1):1-8.

[6] 赵明华, 陈刚. 高海拔寒冷地区混凝土施工关键技术研究[J]. 施工技术, 2025, 54(8):89-93.