

高边坡生态加筋挡土墙施工工艺与变形监测

董浪军

上海飞滕建设发展有限公司，上海 201907

DOI:10.61369/ERA.2026060021

摘 要： 本文以越州 ±800 千伏换流站工程四通一平项目为背景，针对站区高填方边坡支护工程，系统阐述生态加筋挡土墙的完整施工工艺体系与全过程变形监测技术。详细分析工程地质与水文条件，梳理施工重难点，重点论述从基础处理、加筋材料铺设、分层填筑压实到坡面生态防护的成套施工技术。同时，构建覆盖施工期与工后期的变形监测体系，明确监测点布设原则、监测方法、频率及预警机制。通过本工程实践，验证该工艺在复杂丘陵地形高边坡支护中的适用性与可靠性，研究可为同类工程提供系统的技术参考与实施范例。

关 键 词： 高边坡支护；生态加筋挡土墙；土工格栅；分层填筑；变形监测

Construction Technology and Deformation Monitoring of Ecological Reinforced Retaining Walls for High Slope

Dong Langjun

Shanghai Feiteng Construction Development Co., Ltd., Shanghai 201907

Abstract： This paper takes the "Four Supplies and One Leveling" project of the Yuezhou ±800 kV converter station project as the background, focusing on the high-fill slope support project within the station area. It systematically elaborates on the complete construction technology system and full-process deformation monitoring techniques for ecological reinforced retaining walls. A detailed analysis of the engineering geological and hydrological conditions is conducted, along with an overview of the key challenges and difficulties in construction. The paper emphasizes the complete set of construction techniques, ranging from foundation treatment, laying of reinforced materials, layered filling and compaction, to ecological slope protection. Additionally, a deformation monitoring system covering both the construction and post-construction periods is established, specifying the principles for monitoring point layout, monitoring methods, frequency, and early warning mechanisms. Through practical application in this project, the applicability and reliability of this technology in supporting high slopes in complex hilly terrains are verified, providing systematic technical references and implementation examples for similar projects.

Keywords： high slope support; ecological reinforced retaining wall; geogrid; layered filling; deformation monitoring

引言

在电网建设，尤其是特高压换流站工程中，站址常选址于丘陵山区，场地平整形成的高填方边坡稳定性成为“四通一平”阶段的关键控制性难题^[1]。传统刚性支挡结构常存在生态景观效果差、对地基变形适应能力弱等问题。生态加筋挡土墙技术融合了加筋土结构与生态防护理念，通过土中加筋材料提高土体自身强度和整体稳定性，并采用柔性面层实现植被生长，兼具结构安全、环境友好与经济合理等优势^[2]。越州 ±800 千伏换流站工程填方区边坡最大高度达 22m，地质条件复杂，对支挡结构提出较高要求。本文旨在系统总结该工程中高边坡生态加筋挡土墙从施工到监测的全过程关键技术，以期为类似环境下的边坡支护工程提供详实借鉴。

一、工程概况与边坡特点难点分析

越州 ±800 千伏换流站站址位于浙江省绍兴市上虞区驿亭镇二都村南侧，地处罗岩山山脚，属典型浙东低山丘陵地貌，原始地形起伏显著，自然地面标高介于 45.32m 至 88.19m 之间。本工

程“四通一平”阶段土石方工程量巨大，总挖方约 103 万 m³，总填方约 99 万 m³。其中，填方区边坡采用生态加筋挡土墙进行防护，最大填筑厚度 22m，边坡设计坡率根据高度分段设定，整体稳定性要求高。

（一）工程地质与水文条件

根据详细地质勘探报告，站址区域地层自上而下分布为：①1层素填土，松散，工程性质差；②1层含碎石粉质黏土，可塑状，混角砾碎石，层厚变化大（2.0~18.60m），工程性质较好，为主要填筑料源之一；②2层含黏土，软塑，高压缩性、低强度，仅局部钻孔揭示，为工程薄弱层；③1层含碎石粉质黏土，硬可塑；④1层全风化凝灰岩；④2层强风化凝灰岩；④3层中等风化凝灰岩，力学强度高，是良好持力层。场地浅部地下水为第四系孔隙潜水，受大气降水补给，水位变幅2.0~3.0m，对边坡长期稳定性构成潜在影响。土壤及地下水对混凝土结构及钢筋具微腐蚀性。

（二）边坡特点与施工难点

本工程填方最大高度达22m，由此产生的巨大水平土压力对加筋材料的强度、耐久性及筋土界面摩擦性能提出极高要求。地质条件方面，局部存在的②2层软塑状高压缩性黏土具有高压缩性，易引发不均匀沉降，影响加筋墙体整体协调变形。水文条件亦较为复杂，季节性降水丰沛，地表水与地下水活动频繁，必须严格控制填料含水量，并确保坡面及内部排水系统长期有效。此外，项目需兼顾生态与结构要求，在保障结构安全的基础上实现坡面快速植生绿化，对填筑工艺、面层处理及加筋材料反包节点设计提出诸多技术挑战。

针对施工难点采取了以下措施：针对22m高填方产生的水平土压力，选用双向拉伸聚丙烯土工格栅（TGSG30-30），其极限抗拉强度 $\geq 30\text{kN/m}$ ；针对②2层软塑黏土引发的不均匀沉降，采用级配碎石垫层（厚50cm）+土工格栅复合地基处理；针对水文条件复杂问题，设置“截水沟+坡面泄水孔+墙趾排水盲沟”三级排水系统；针对生态与结构协同要求，采用植生袋反包工艺实现坡面绿化。

二、生态加筋挡土墙施工工艺

（一）施工工艺流程

生态加筋挡土墙施工遵循“分层开挖、分层填筑、分层加筋、分层压实、同步防护”的逆作思路^[3]。核心工艺流程精简为：施工准备与测量放样→基底处理→加筋材料铺设张拉→填料摊铺压实→格栅反包与连接→重复填筑至设计标高→生态防护与排水系统施工。全过程需与变形监测紧密配合，实行信息化施工。

（二）基底处理与排水系统施工

基底处理需清除边坡范围内的植被、树根、腐殖土及障碍物，确保坡脚基础开挖至设计标高，形成坚实、平整的基底^[4]。若遇②2层等软弱土层，应依据设计要求采用级配良好的砂砾石或碎石进行换填，并分层压实至设计密实度。排水系统施工中需在边坡顶缘后方设置截水沟以拦截外部地表径流，同时在加筋土挡墙底部布设排水沟，其沟底坡度不小于0.5%以利汇水顺畅排出。

墙体内部部分层铺设透水性填料或土工排水材料，形成有效内部排水通道，降低墙后积水导致的孔隙水压力。所有排水沟接缝须严密处理，防止渗漏。

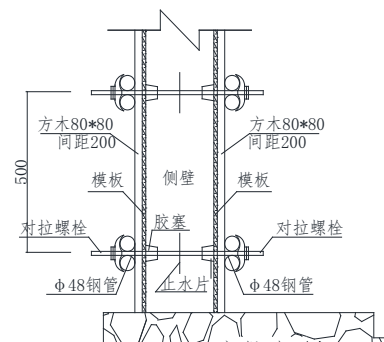


图1 安装及加固图示

（三）墙体填筑与分层施工技术

格栅按设计长度裁剪时，必须保留至少一整排完整的60mm长纵向肋条，以保证连接强度^[5]。铺设时使格栅主受力方向垂直于坡面，采用人工拉紧并结合专用张拉梁施加预张力，确保格栅平顺、紧密贴附于已压实的填土表面，消除褶皱，以减少初始变形。格栅张拉就位后，应立即使用U形钢筋钉等锚固件以横向@500mm、纵向每2~3m一排的间距将其临时固定于下层土体中，防止后续填土施工时移位。相邻两幅格栅之间采用专用聚合物连接棒进行连接，连接棒必须穿过搭接处每一根肋条，确保力的有效传递，同时检查搭接宽度是否符合设计要求。每层填土压实并完成坡面修整后，将预留的格栅端部反折覆盖在坡面填土上，反包长度不小于1.5m。反包部分与上一层铺设的格栅通过连接棒进行可靠连接，形成连续加筋体，确保该节点作为筋材与面层间力系转换关键部位的结构牢固性。

（四）加筋材料铺设与锚固施工技术

填料严格按照设计要求选用填料，本工程规定填料容重不小于 19kN/m^3 ，等效内摩擦角不小于 35° 。优先使用站区开挖的②1层或③1层含碎石粉质黏土。填料最大粒径不得超过150mm，且粒径大于100mm的颗粒含量不宜超过总重的15%。施工前通过击实试验确定填料的最优含水量，施工中控制实际含水量在最优值 $\pm 2\%$ 范围内，过湿需晾晒，过干需洒水闷料。摊铺与平整中填料采用自卸汽车运输至工作面，用推土机初步摊平，再用平地机精平。每层虚铺厚度严格控制在300mm以内，并保持铺土面平整，横向设置2%~4%的排水横坡。压实作业是保证压实度 ≥ 0.94 的核心。采用5t以下轻型振动压路机或手扶式振动夯进行压实。碾压路线从格栅中部开始向尾部进行，再从中间向坡面方向进行。碾压轮迹需重叠1/3以上。靠近反包坡面1m范围内禁止重型机械碾压，必须采用人工或蛙式打夯机夯实，防止机械对格栅和坡面结构造成破坏。坡面生态防护中在每一层填筑压实、格栅反包后，立即在坡面位置人工码放预先装填好混合草籽与肥料的生态麻袋。麻袋尺寸为 $400*300*200\text{mm}$ ，需装填饱满、重量均匀，码放时上下错缝、拍打密实，形成整齐稳定的坡面轮廓线。麻袋既是临时模板，也是永久生态载体。

（五）关键节点与特殊部位处理

在边坡转角处，格栅须采用环绕方式铺设。外转角部位若出现空隙，应裁剪同规格格栅片进行补强覆盖；内转角出现格栅重叠时，需在重叠区域铺设一层10~20mm厚的中粗砂作为隔离层，避免筋材直接摩擦受损。当加筋土挡墙与进出站道路挡墙、排水涵洞等刚性结构物衔接时，应设置柔性过渡段，可通过增加加筋

层数或采用渐变强度格栅实现，并做好连接部位的防排水处理，以降低差异沉降引起的开裂风险。雨季施工期间需密切关注天气预报，提前备足防水篷布。摊铺后的填料应及时碾压成型，避免雨水浸泡；已铺设但未覆土的格栅须进行临时覆盖。同时应保持作业面及周边排水畅通，防止现场积水。

三、变形监测体系建立与实施

（一）监测内容与监测点布设

监测内容主要包括墙顶水平位移、墙顶及墙体内部分层沉降以及坡面外观巡检，涵盖裂缝、鼓胀与渗水等现象。监测点应沿挡墙延伸方向按每15-30m 间距布设主监测断面，每个断面需在墙顶、墙高1/2处（可根据实际高度增加监测层位）及墙脚分别设置兼具位移与沉降监测功能的测点。测点应采用强制对中标志或预埋钢筋桩等方式，确保其稳固可靠。同时，需在远离挡墙的稳定区域设置不少于3个基准点，以构成完整的监测控制网。

（二）监测方法与频率

测量方法：水平位移采用高精度全站仪进行极坐标法或小角度法观测；沉降采用精密水准仪按二等水准测量要求进行闭合路线观测。所有测量需固定人员、固定仪器、固定路线，以减小系统误差。

监测频率按阶段划分：施工期间，每完成3层加筋填筑（高度约1.0-1.2m）进行一次全面监测；竣工初期，首月每周监测一次，第2至3个月每两周一次；运营后期，竣工后3个月至1年内每月一次，1年后调整为每季度一次，之后每年于雨季前后各监测一次。遇连续降雨或地震等特殊情况，应适当加密观测频次。

（三）监测数据分析、预警与反馈

数据整理阶段需及时计算各监测点的累计位移量与沉降量，并确定本期变化速率；同时应绘制位移-时间与沉降-时间关系曲线，以便动态反映变形趋势。控制标准与预警机制依据设计要求及相关规范，并结合本工程实际特点进行制定，具体监测控制标准见表1。

表1 高边坡生态加筋挡土墙施工期监测预警控制标准

监测项目	控制标准 (累计值)	预警值 (累计值)	报警值 (累计值)	速率控制标准 (每日)
墙顶水平位移	≤墙高的0.3%(且≤50mm)	达到控制标准80%	达到或超过控制标准	≤2.0mm
墙顶沉降	≤30mm	达到控制标准80%	达到或超过控制标准	≤1.5mm
填筑层差异沉降	≤层厚的0.5%	—	连续两层超限	—

根据越州 ±800 千伏换流站工程施工工期及竣工后连续半年的监测数据显示，各监测点墙顶水平位移最大为12.5mm，远低于

控制标准（≤50mm）；墙顶沉降最大为8.3mm，小于控制标准（≤30mm）。位移-时间及沉降-时间曲线均呈收敛趋势，表明边坡稳定性良好。通过与表1 控制标准对比，实际监测值均未达到预警值（水平位移预警值40mm，沉降预警值24mm），日变化速率最大为0.8mm/ 天，满足≤2.0mm/ 天的速率控制要求。

数据分析表明，加筋材料的抗拉强度及筋土界面摩擦性能有效控制了变形，分层填筑压实工艺和完善的排水系统（截水沟 + 坡面泄水孔 + 墙趾排水盲沟）降低了孔隙水压力，避免了水害导致的变形加剧。施工中格栅张拉预紧、边缘人工夯实等精细化操作进一步减少了初始变形，确保加筋体整体协调受力。监测数据达到预警值时，分析原因并加强监测频率。当达到报警值或变化速率持续超标时，必须立即暂停施工，启动应急预案，采取如减载、补强加筋、注浆加固等工程措施。

四、工程实施效果及经验总结

越州换流站填方区生态加筋挡土墙施工完成后，边坡整体线形顺直，坡面生态袋内草籽已初步萌发，呈现良好生态效果。施工期及竣工后连续半年的监测数据显示，所有监测断面墙顶最大水平位移小于15mm，最大沉降小于10mm，位移与沉降曲线均已趋于收敛平稳状态，表明边坡处于稳定安全状态。

前期地质勘察是工程基础，精准掌握软弱夹层分布与水文条件，为针对性设计和施工预案提供依据。填料质量是内在保证，严格控制其粒径、级配及含水量，以实现高压实度与良好的筋土摩擦性能。精细化施工是关键环节，格栅的张拉、固定、连接及反包等工序应严格按工艺操作，避免疏漏，并采用轻型机械碾压与边缘人工夯实相结合的方式，有效保护加筋结构。排水系统通过完善的地表截排水及墙体内排水系统可有效降低水害风险。及时的变形监测不仅保障施工安全，也为动态评估结构状态、验证设计合理性提供数据支撑。

五、结语

在越州 ±800 千伏换流站高填方边坡工程中，通过系统应用生态加筋挡土墙施工技术，并辅以全过程变形监测，成功解决复杂地形条件下高边坡的稳定与生态防护问题。实践表明，该技术体系具有施工相对灵活、对地基适应性强、生态效益显著等优点。其成功实施依赖于精细化的施工组织管理以及科学的信息化监测反馈。本工程所总结的工艺要点与管控经验，可为今后类似环境下的电力基础设施乃至其他行业的高边坡工程建设提供切实可行的技术路径与工程借鉴。

参考文献

[1] 张俊腾, 刘常涛. 软土地基上生态加筋挡土墙力学性状的现场试验和数值模拟分析 [J]. 宁德师范学院学报 (自然科学版), 2025(1).
[2] 张川, 李红亮, 褚丽. 自嵌式植生挡土墙在淮阳县七里河挡墙式护坡中的应用及推广 [C]//2024（第三届）城市水利与洪涝防治学术研讨会论文集 .2024.
[3] 王智明, 张智超, 齐昌广. 原位钻孔剪切试验在加筋土挡墙填土中的应用研究 [J]. 工程勘察, 2024, 52(12): 28-32.
[4] 尤文贵, 张俊腾. 软土地基上柔性加筋挡土墙的研究现状综述 [J]. 安徽建筑, 2025, 32(1): 132-134.
[5] 马之东. 装配式模块化生态挡土墙快速安装施工技术 [J]. 山西建筑, 2025(16).