

针对淤泥质黏土及高填方地基处理方案的深化研究

张红¹, 戢军², 常伟¹, 师骁², 贾鹏¹

¹中国电力工程顾问集团西北电力设计院有限公司, 陕西 西安

²国网四川省电力公司建设分公司, 四川 成都

收稿日期: 2025年8月11日; 录用日期: 2025年9月1日; 发布日期: 2025年9月12日

摘要

成都东1000 kV变电站作为“西电东送”战略的重要枢纽, 建设过程中面临严峻的地质挑战, 站址内存在淤泥质黏土、以风化基岩为主要回填料的高填方, 而普遍存在于站区的风化基岩具有遇水易离析崩塌特性, 这些不良地质都会导致地基湿陷沉降和变形。针对场地存在2~7 m厚、体积约250,000 m³的淤泥质黏土, 以及最大13 m厚的填方问题, 采用常规强夯法可能会使淤泥质黏土变成橡皮土, 不能满足设计要求。通过方案比选与现场试验, 提出“强夯置换 + 分层强夯 + 灌注桩”的综合处理方案, 利用挖出的中风化基岩通过强夯工艺置换淤泥质软土, 再分层夯实风化基岩回填土层, 最后在夯实地基上浇筑灌注桩。该方案不仅提高建(构)筑物地基承载力, 减少桩基负摩阻力, 又能有效控制地面沉陷与不均匀沉降; 同时通过设置排洪沟、盲沟及站内排水沟等一系列有组织排水措施, 保证风化基岩的稳定。该方案具有良好的技术可行性和经济性。其中强夯置换处理方案作为场地预处理在特高压工程中的首次大面积应用, 研究成果可为复杂地质条件下特高压变电站的地基处理设计提供借鉴和参考。

关键词

地基处理, 高填方, 淤泥质黏土, 风化基岩, 强夯法, 强夯置换法, 旋挖钻孔灌注桩

In-Depth Research on Soft Soil and High Fill Foundation Treatment Scheme

Hong Zhang¹, Jun Ji², Wei Chang¹, Xiao Shi², Peng Jia¹

¹North West Electric Power Design Institute Co., Ltd. of China Power Engineering Consulting Group, Xi'an Shaanxi

²State Grid Sichuan Electric Power Company Construction, Chengdu Sichuan

Abstract

The Chengdu East 1000 kV Substation, as a critical hub of the “West-to-East Power Transmission” strategy, faced severe geological challenges during its construction. The site contained mucky clay and high fill areas primarily composed of weathered bedrock. The prevalent weathered bedrock across the station area exhibited characteristics of easy disintegration and collapse upon contact with water, while these unfavorable geological conditions could lead to foundation wetting-induced settlement and deformation. To address the site’s mucky clay layer, which was 2~7 meters thick with a volume of approximately 250,000 m³, as well as fill areas with a maximum thickness of 13 meters, conventional dynamic compaction methods risked turning the mucky clay into elastic soil, failing to meet design requirements. Through solution comparisons and field tests, a comprehensive treatment scheme of “dynamic compaction replacement + layered dynamic compaction + bored piles” was proposed. This method involved excavating moderately weathered bedrock and using dynamic compaction to replace the soft mucky clay, followed by layered compaction of the weathered bedrock backfill. Finally, bored piles were cast on the compacted foundation. This solution not only improved the foundation bearing capacity of structures and reduced negative skin friction on piles but also effectively controlled ground subsidence and differential settlement. Additionally, by implementing organized drainage measures such as flood diversion ditches, blind drains, and internal drainage ditches, the stability of the weathered bedrock was ensured. The solution demonstrated strong technical feasibility and cost-effectiveness. As the first large-scale application of dynamic compaction replacement for site pretreatment in ultra-high voltage (UHV) projects, this research provides valuable references for foundation treatment design in UHV substations under complex geological conditions.

Keywords

Ground Treatment, High Fill, Silty Clay, Weathered Bedrock, Dynamic Compaction Method, Dynamic Replacement Method, Rotary Drilling Cast-in-Place Pile

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

四川作为“西电东送”工程的核心能源基地,承担着水电及新能源高效消纳的重要任务。为实现“碳达峰”与“碳中和”目标,优化川渝地区清洁能源配置,建设特高压变电站成为关键举措之一。成都东1000 kV变电站作为该区域的重要电力枢纽,其建设对促进川西清洁能源输送至成都负荷中心、优化四川电网结构、四川电网提档升级具有重要意义。该变电站位于四川省资阳市乐至县良安镇,站址地貌单元属于典型的丘陵地貌,整体地形呈现东、北、西三面较高,为丘陵坡地,中间及南面较低,为丘陵谷地,最大高差接近100 m,是目前已建成特高压变电站中边坡高度最大的工程。区域内分布有水田、鱼塘、道路、房屋等。站址地质条件复杂,存在最大达13 m厚的回填料(填料以强风化基岩为主)、站址中部场地下覆2~7 m厚、250,000 m³的淤泥质黏土、场地内普遍存在遇水易软化[1]-[4]的风化基岩等多种不良土质,这些土层都会导致填方地基及场地的湿陷沉降变形;此外,成都区域雨水丰富、地下水充沛,这又增加了地基风险。

目前已建成的特高压变电站,通常采用“桩基+强夯预处理”[5]相结合的地基处理方案对高填方场地进行处理。张永宏[6]认为采用强夯加固法可有效解决泥岩在路基填筑中的局限性,何勇[7]研究了某特高压换流站对泥岩高填方地基上采用分层强夯的可行性,杨关[8]提出了采用强夯半置换法,通过添加外购碎石,对高含水量的粘性土高填方场地处理方案;但针对处理原场地大范围淤泥质黏土地基,是否可以采用风化基岩作为强夯置换料,尚无类似工程经验可供参考。且现行有关设计标准[9]-[11]对于强夯置换作为预处理场地的设计参数选用缺乏有效指导,更进一步增加了工程设计的复杂性。

为处理淤泥质黏土和强风化基岩高填方地基,提出了一种适合本工程经济合理的地基处理方案,即对淤泥质黏土场地采用强夯置换法,利用向夯坑内填入挖出的中风化基岩,通过强夯工艺置换出淤泥质黏土,达到加固软土地基的目的;随后对风化基岩回填土进行分两层强夯处理[12];最后,在夯压密实的场地上,对主要建(构)筑物基础范围实施旋挖钻孔灌注桩,同时在站区内设计有组织的排水措施,以确保站区排水通畅。通过这一系列综合处理方案,不仅保证地基稳定性,提高桩基承载力,还有效减小地面不均匀沉降。

本文旨在详细阐述成都东 1000 kV 变电站的地基处理方案,重点论述强夯及强夯置换方案的设计参数选择,以及实施过程中遇到的技术难点及解决措施,以期为类似地质条件工程提供技术参考。

2. 场地工程地质条件

本场地划分为两个工程地质单元,即丘陵谷地和丘陵坡地。丘陵坡地上部地层主要为粉砂质泥岩或泥质粉砂岩、泥岩、砂岩;丘陵谷地上部地层主要为素填土、新近沉积淤泥质黏土、冲洪积黏土以及粉砂质泥岩、泥质粉砂岩、砂岩、泥岩等软质岩基岩组成。各层地基土岩性特征、埋藏条件及承载力特征值详见表 1。

Table 1. Rock characteristics, burial conditions, and bearing capacity characteristics of foundation soil

表 1. 地基土岩性特性、埋藏条件及承载力特征值

地层编号	岩性描述	压缩模量 MPa	地基承载力特征值 $f_{ak}(kPa)$
① ₁ 素填土	稍湿~湿,主要组成为黏土,植物根系及腐殖质富集,围湖造田回填形成。	/	/
① ₂ 淤泥质黏土	饱和,流塑~软塑,含有机质及植物根系,该层普遍分布于丘陵谷地地段。	3	65
① ₃ 黏土	饱和,可塑~硬塑,土质不均匀,混少量砾石。该层主要分布于丘陵谷地地段。	6.8	110
② ₂ 黏土	稍湿,硬塑,土质不均匀,该层主要分布于丘陵坡地。	7	150
③ 基岩	该层可进一步划分出强风化层及中等风化层,强风化层厚薄不均。	30	250~500

*基岩主要由粉砂质泥岩、泥质粉砂岩、砂岩、泥岩等软质岩组成,下文统一简称基岩。

由上表可知,(1)淤泥质黏土层地基承载力低,压缩性高,13 m 厚回填土更加速土体沉降,进而引发桩侧负摩阻力,且钻孔遇此土层极易塌孔,因此需要对该土层进行处理。(2)基岩层工程性能较好,压缩性低,在挖方区可作为良好的天然地持力层,在填方厚度较大地段,也是较好的桩端持力层。但强风化基岩单轴抗压强度(干)为 11 MPa,而单轴抗压强度(饱和)仅为 4.2 MPa,说明其具有遇水离析崩塌的特性。成都属于多雨地区,所以保证站区排水通畅也尤为重要。

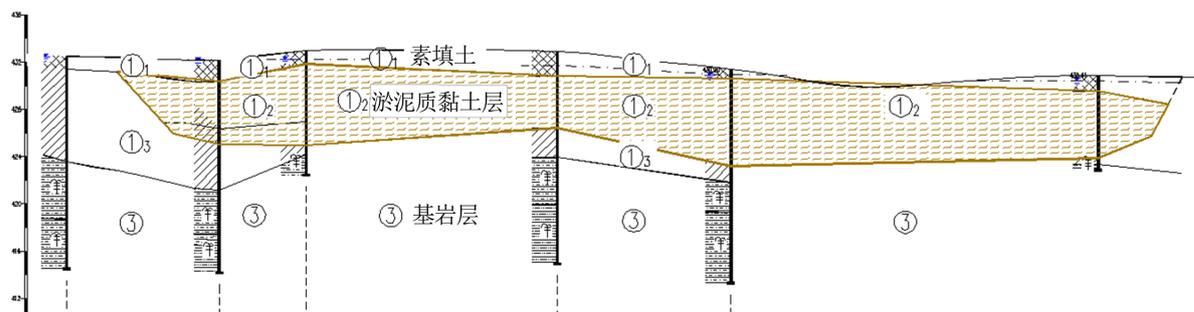
站址原始地貌图如图 1 所示,建成后变电站实景图如图 2 所示,横穿站址典型地质剖面图如图 3 所示。



Figure 1. Original topographic map of the station sit
图 1. 站址原始地貌图



Figure 2. Realistic view of substation
图 2. 变电站实景



注：①₁为素填土；①₂为淤泥质黏土；①₃为粘土；②为粘土；③为基岩，包含强风化或中风化砂岩；强风化或中风化泥岩；强风化或中风化砂质泥岩；强风化或中风化泥质砂岩。

Figure 3. Typical geological profile map of the station site
图 3. 站址典型地质剖面图

3. 站址竖向布置

站址区地形起伏大，站区竖向采用平坡式布置。场地整平后，场地东部和西北部处于挖方区，最大挖方厚度 64 m；场地中部及南部均处于填方区，最大填方厚度 13 m。

站区场地平整后初平标高 441.30 m。站区土方平衡示意如图 4 所示, (图中阴影部分为填方区, 其余为挖方区); 淤泥质黏土范围如图 5 所示, (阴影部分为存在淤泥质黏土区域)。

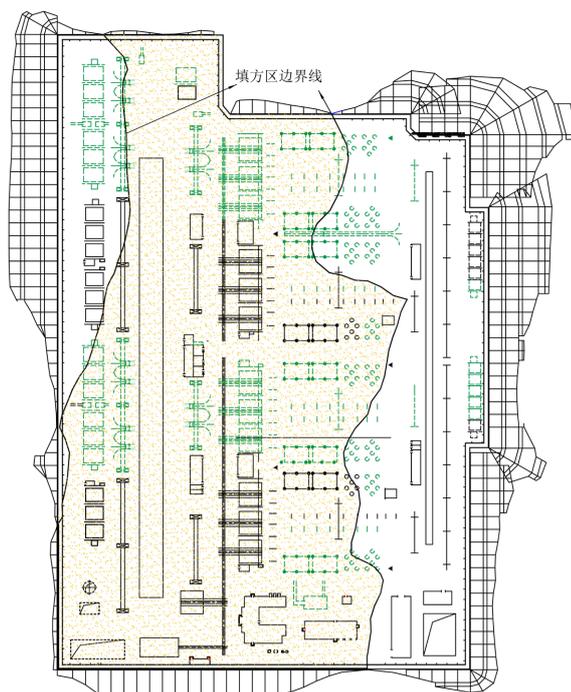


Figure 4. Schematic diagram of earthwork balance in the station area
图 4. 站区土方平衡示意图

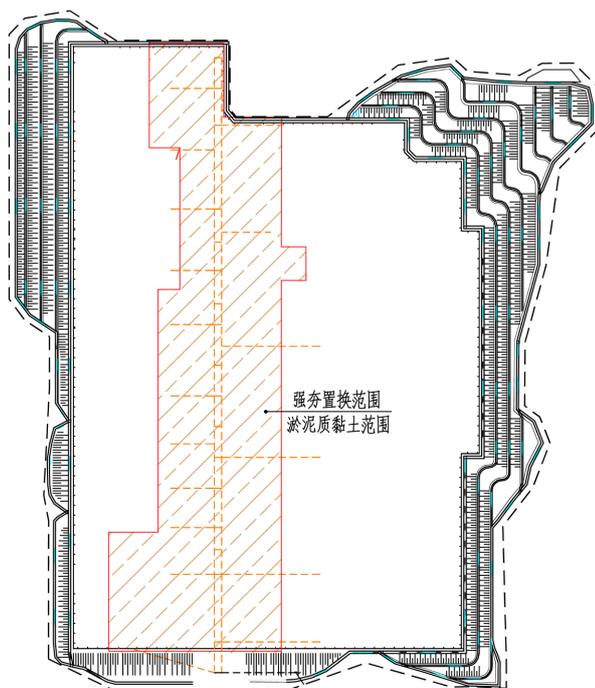


Figure 5. Silty clay range
图 5. 淤泥质黏土范围

4. 桩基方案

围墙内挖方区丘陵坡地的建(构)筑物采用天然地基,以③基岩层为天然地基持力层;填方区丘陵谷地最大填土厚度 13 m,站址中部场地贯通南北存在 2~7 m 厚淤泥质黏土,以及厚度不等的黏土层,下覆稳定持力层——中风化基岩。填方区需处理的工程性能较差土层累计最大厚度达 27 m,因而该区域的建(构)筑物采用安全可靠的桩基方案,以中风化基岩为桩端持力层。

适于本站址的桩基方案有预制混凝土实心桩及旋挖钻孔灌注桩[13]-[15]。表 2 对上述两种桩型进行技术、经济比较。

Table 2. Comparison of two pile types technology and economy

表 2. 两种桩型技术与经济比较表

桩基类型	预制混凝土实心桩	旋挖成孔灌注桩
规格	500 mm × 500 mm 方形	Φ600 mm 圆形
概算定额单价/(元/m ³)	2025	1800
每延米混凝土量(m ³)	0.28	0.25
7300 根桩,平均桩长 20.5 m 计桩基混凝土量(m ³)	41,902	37,412
桩基费用(万元)	8485.16	6734.25
优点	承载力高;质量保证;有挤土作用	质量保证,低噪音、低振动。
缺点	现场接桩、截桩工程量大;锤击沉桩噪声大。	有塌孔的可能,孔底清渣困难。
本工程适用性	本工程基岩层顶面标高起伏变化大截桩或接桩 工作量大,截桩会造成浪费。	适用于本工程,但需要对可能出现的 塌孔采取泥浆护壁或护筒措施。

通过表 2 可知:本工程桩基持力层顶面标高起伏变化大,采用旋挖成孔灌注桩,桩长容易得到控制、低噪音、低振动、质量保证、施工速度快,更适用本工程;且旋挖成孔灌注桩的混凝土方量、造价均小于预制混凝土实心方桩,无论从技术与经济角度,旋挖成孔灌注桩均优于采用预制混凝土实心方桩。因此,本工程采用旋挖成孔灌注桩。

5. 场地预处理方案

5.1. 场地预处理的必要性

站址内 13 m 厚回填土的附加应力显著,自重固结可能引发差异沉降或深层滑移;淤泥质黏土层分布于大部分丘陵谷地,厚度约 2~7 m,具有高含水量、低渗透性、高压缩性、低强度及欠固结等特性,工程性能差。回填土层和淤泥质黏土层两种土层沉降产生的桩侧负摩阻力,大幅降低桩基抗压承载力,桩基成孔遇此土层时也易塌孔。

根据规范规定,桩穿越松散填土、软弱土层时,应计入桩侧负摩阻力,13 m 厚回填土 + 7 m 厚淤泥质黏土引起的桩侧负摩阻力为 754 kN,通过试桩承载力检测,25 m 桩抗压承载力特征值能达到 1800 kPa,折减后 25 m 桩基抗压承载力特征值仅为 1046 kN,地基承载力折减 40%。

另外,场地内的电缆沟、地面等附属构筑物虽然荷载不大,但由于回填土及淤泥质黏土地基的欠固结沉降会造成电缆沟开裂、地面沉陷等,不仅影响美观,严重者会压断地下电缆,触发开关而断电,给运维造成不必要的麻烦。

所以对填土及淤泥质黏土地基进行预处理是非常必要的。

5.2. 场地预处理方案

5.2.1. 填土地基预处理方案

结合场平施工, 回填土每 400 mm 亚层碾压一次, 再采用强夯法对碾压填土进行处理。13 m 厚填土分两层强夯, 主夯夯击能 6000 kN·m, 柱锤直径 2.5 m, 夯点间距 5 m, 平均每夯点连续 10 击, 停夯标准为最后两击平均夯沉量为 100 mm, 满夯采用 2000 kN·m 夯击能。经检测, 夯后地基承载力特征值均不小于 200 kPa。

5.2.2. 地下淤泥质黏土地基处理方案

站址约 53,000 m² 场地地下覆近 250,000 m³ 淤泥质黏土, 其塑性指数 $I_p = 17.3$, 液性指数 $I_L = 0.93$, 含水量大, 不适于采用强夯加固, 易造成“橡皮土”状态。因而对淤泥质黏土地基的处理也是本工程设计难点之一, 处理方案主要有以下三种:

1) 全部挖除淤泥质黏土方案: 有专家提出应挖除全部淤泥质黏土, 利用场地土分层回填碾压再强夯。其优点为: 可以完全清除淤泥质黏土, 提高承载力; 缺点为: 变电站中部从北向南贯穿整个站址存在近 250,000 m³ 淤泥质黏土层, 开挖工程量巨大, 成都地处多雨地区, 整个变电站将成为一个巨大的积水区, 对地下强风化基岩也造成不利影响, 且挖出的淤泥质黏土, 场地内无处晾晒, 大方量弃土无法通过环评审查。因此此方案不可行。

2) 水泥搅拌桩加固方案: 其优点为: 加固后承载力高, 可处理整个淤泥质黏土层; 其缺点为: 现场不但需要配置多台打夯设备, 还要配置水泥搅拌桩设备, 且站内需增设水泥搅拌站及其排污沟, 不利于文明施工。因此此方案技术可行但不推荐。

3) 强夯置换法: 即向夯坑内填入级配良好的块石、碎石等硬质散体料, 通过高能量夯击, 将置换材料夯入软弱土层(如淤泥质黏土)中, 形成一个个置换墩[16], 与周围土体组成复合地基。与强夯挤密原理不同, 强夯置换 = 强夯(挤密) + 碎石墩 + 特大直径排水井, 以强度高的粗粒料置换强度低的淤泥质土, 墩间和墩下的粘性土通过排水与加密, 其密度及强度可以改善。其优点为: 强夯置换仍采用打夯设备, 施工简单, 速度快, 且文明施工; 其缺点为: 挤出的淤泥质黏土隆起需要二次开挖、倒运、晾晒, 再参与场地回填。强夯置换法示意图如图 6 所示。

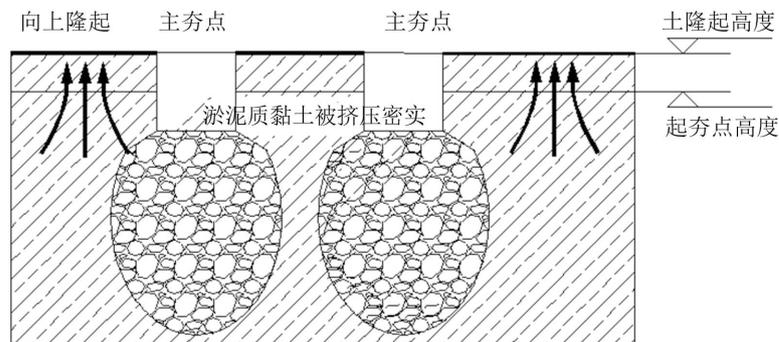


Figure 6. Schematic diagram of dynamic compaction replacement method
图 6. 强夯置换法示意图

通过综合分析, 最终确定采用强夯置换法处理淤泥质黏土地基, 主夯采用 6000 kN·m 单击夯击能, 夯点间距 3.5 m; 平均每夯点连续 15 击, 置换材料采用站内中风化基岩, 最大粒径为 500 mm, 停夯标准为最后两击平均夯沉量为 300 mm, 累计夯沉量不宜大于墩体设计长度的 1.5~2 倍, 本工程按照 16~18 m

控制。满夯采用 2000 kN·m 夯击能。经检测，处理后的地基承载力特征值无论墩点还是墩间土均达到 200 kPa。强夯及强夯置换施工现场如图 7 所示。



Figure 7. Construction drawing of dynamic compaction site
图 7. 强夯置换及强夯现场施工图

6. 试夯及试桩过程中存在问题与解决措施

尽管强夯置换技术和旋挖钻孔桩工艺已相对成熟，但在本工程试桩和试夯阶段仍遭遇重重困难，若干关键技术难题需通过试验分析提出针对性解决方案。

6.1. 强夯置换方案的置换材料的选择与优化

6.1.1. 强夯置换方案置换材料的选择

全站需对约 53,000 m² 淤泥质黏土地基进行强夯置换，置换材料方量达 262,880 m³。根据《强夯地基处理技术规程》规定墩体置换材料可用级配良好的块石、碎石、矿渣、建筑垃圾等硬质粗颗粒材料。既往工程均采用全部或部分外购碎石作为置换料。

1) 外购碎石方案：若全部采用外购碎石作置换料，按运距 30 km，单价 185 元/m³ 计，仅材料成本高达 4863 万元；同时产生 262,880 m³ 弃土，因山区运输条件恶劣，弃土费用将增加 240 万元，总费用达 5103 万元。

2) 就地取材方案：站内场平后丘陵坡地地段可挖出约 1,000,000 m³ 土，经测算其中 250,000 m³ 为中风化基岩，基本可以满足强夯置换所需的方量。站区内风化基岩具有显著的水理特性差异，其地基承载力特征值 450 kPa，干态单轴抗压强度为 11 MPa，但饱和态单轴抗压强度降为 4.2 MPa。开挖后的强风化基岩在成都地区多雨环境下易发生软化现象，暴露后迅速从块状结构劣化为粉末状。

风化基岩作为置换材料时，其遇水软化特性是否会导致墩体强度不足，影响地基处理效果，需通过室内试验和现场工艺试验验证。该问题成为专家论证会的争议焦点，也成为本工程地基处理方案能否优化的关键。

6.1.2. 解决措施

1) 针对风化基岩显著的水理特性差异，全站做好排水措施。

风化基岩干燥状态强度高，但遇水易软化，所以解决好站区排水通畅尤为重要。

站址地域降水充沛，站址区中部丘陵丘陵谷地地段为原始汇水、排水通道，场地整平后将改变地表径流条件，但降雨入渗地下水将仍以该原始谷地作为径流、排泄通道。此区域填土及置换后的场地大多为具有遇水易崩解、软化特性的风化基岩，如排水不畅易引起该区域填方及置换场地土体软化产生沉降和不均匀沉降，进一步增加场地的不稳定性。为防止地下水滞留对基岩造成不良影响，所以站区需要设计有组织排水系统，保证排水通畅。设计采取以下三种措施：

(1) 在站外沿围墙设置一圈排洪沟，将山体坡面洪水阻挡，并引导排至南侧水库。

(2) 站内回填土前，在丘陵谷地地段沿站址南北向设置两条直径 2000 mm 的纵向碎石盲沟及若干直径 800 mm 的细小分支碎石盲沟，将站外坡地的地下孔隙水有组织地排至南侧低洼地带的水库，保证站内排水通畅，防止基岩遇水软化。站外坡面排洪沟布置图、站区盲沟布置图及主盲沟断面示意图如图 8、图 9 和图 10 所示。

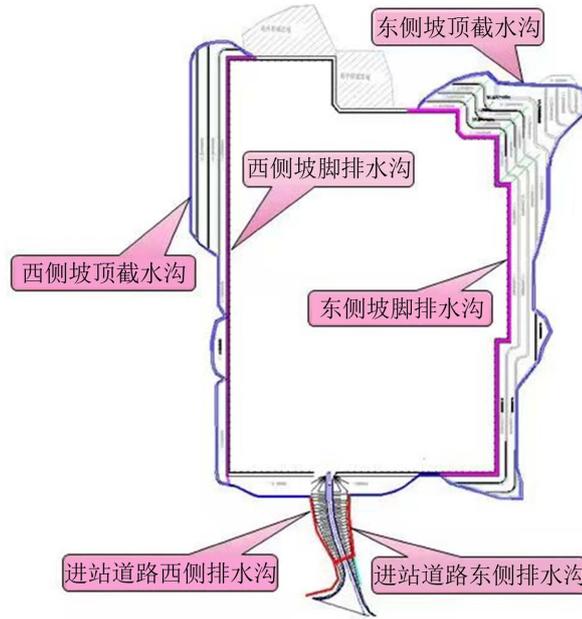


Figure 8. Layout of drainage ditch on the slope outside the station
图 8. 站外坡面排水沟布置

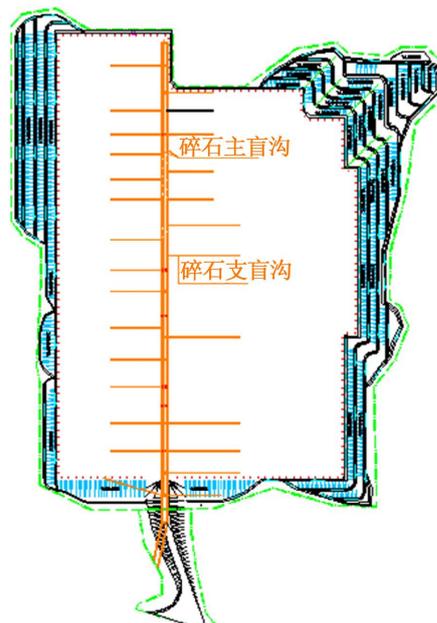


Figure 9. Blind ditch layout plan
图 9. 盲沟布置图

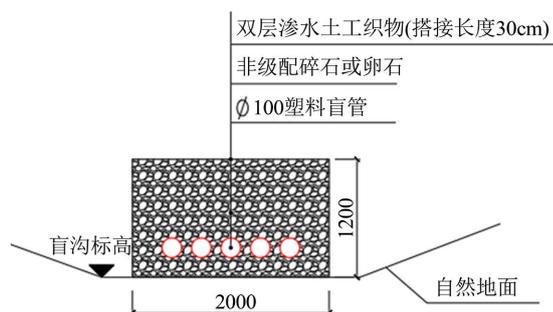


Figure 10. Schematic diagram of the main blind ditch section

图 10. 主盲沟断面示意图

(3) 站区内设置雨水检查井，通过排水管道将雨水汇集至雨水泵坑再集中排至站外管道。

通过以上三种措施，将站外坡地的表面雨水、地下径流以及站内雨水均通过有组织排水进行疏导，避免雨水滞留，保证站内排水通畅。工程建成一年以来，场地内无积水现象。

2) 针对能否采用风化基岩作为置换料，本工程选取两个试夯区(面积均为 900 m²)，以确认两种强夯置换方案的实际影响深度、承载力、压缩模量、休止期等设计参数，同时确定最佳夯击数和最后两击夯沉量。试夯一区、试夯二区强夯置换设计参数如表 3 所示。

Table 3. Trial ramming area design parameters table

表 3. 试夯区设计参数表

	主夯能级 (kN·m)	平均击数	满夯能级(kN·m)	平均击数	最后两击平均 夯沉量(mm)	置换材料	填入方量 (m ³)
试夯一区	6000	15	1500	5	200	外购碎石	5600
试夯二区	6000	15	1500	5	300	场地内中风化基岩	4800

对试夯一区、试夯二区的墩点及墩间土分别进行标准贯入度试验、平板载荷试验，平板载荷试验成果对比如图 11 所示。

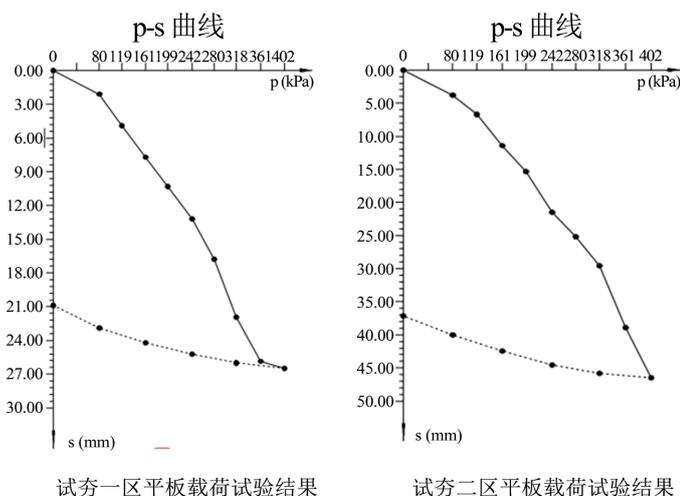


Figure 11. Comparison of plate load test results

图 11. 平板载荷试验结果对比

试夯区检测报告结果如表 4 所示。

Table 4. Test tamping zone inspection report results
表 4. 试夯区检测报告结果

	检测深度(m)	密实度	地基承载力特征值 (kPa)	压缩模量 (MPa)	最后一级沉降量 (mm)	累计沉降量 (mm)
试夯一区	5.5 m 以上	密实	>200	>10	2.42	25.45
	5.6~9.1 m	稍密	130~224	7.15		
试夯二区	5.5 m 以上	密实	>200	>10	7.62	46.55
	5.6~9.1 m	稍密	98~157	5.53		

根据《电力工程地基处理技术规程》DL/T 5024-2020 中单击夯击能与置换深度的关系式 $E_N = 940 \times (H_1 - 3.3)$ ，当设计置换墩长度 H_1 取 9 m 时，计算所得理论单击夯击能 E_N 为 5358 kN·m。为确保施工可靠性，实际选用 6000 kN·m 的单击夯击能进行强夯置换施工，理论上应能置换 9 m 深度的淤泥质黏土层。

由检测结果可知，试夯一区和试夯二区的有效加固深度约 5.5 m，较理论测算值存在一定差距，表明部分深层淤泥质黏土层尚未被完全置换。经软弱下卧层验算确认，当前处理后的地基承载力及沉降量已满足场地预处理要求，同时符合道路、电缆沟等次要构筑物地基的设计标准。

由检测结果可知，试夯二区沉降较试夯一区略大。根据规范要求，最大累计沉降量应小于平板宽度的 0.06 倍，试夯二期最大累计沉降量 $46.55 \text{ mm} < 0.06 \times 1400 \text{ mm}$ (平板宽度) = 85 mm，未达到规范规定的破坏分界点。可见，试夯一区和试夯二区均满足设计要求，试夯二区较试夯一区置换料方量优化 15%。

因而本工程强夯置换主夯采用 6000 kN·m 夯击能，夯点间距 3.5 m，单点连续夯击数平均 15 击，满夯采用 1500 kN·m 夯击能，单点连续夯击数平均 5 击；置换材料采用站内中风化基岩；停夯标准为最后两击夯沉量不大于 300 mm 且累计总夯沉量不小于 18 m 控制。

6.2. 隆起高度

软弱土层与置换材料压缩特性的显著差异是导致地面隆起的主要原因。在夯击过程中，高压缩性的软弱土层发生竖向压缩，而低压缩性的置换材料则产生侧向挤出变形。基于土体压缩变形理论，该过程包含两个关键变形分量：

竖向压缩变形：受土体压缩模量(E_s)主导；侧向挤出变形：与土体泊松比(ν)密切相关。

淤泥质黏土因其特有的低压缩模量($E_s < 5 \text{ MPa}$)和高泊松比($\nu \approx 0.4 \sim 0.5$)特性，表现出显著的侧向挤出趋势。通过理论模型分析： $\Delta h = E_s P \times (1 - \nu^2)$ (Δh -土体变形量； P -夯击压力； E_s -压缩模量； ν -泊松比)。

现场试验数据显示：试夯一区，平均隆起高度 2.2 m，试夯二区最后两击平均夯沉量为 300 mm，平均隆起高度为 1.8 m。最终强夯置换采用最后两击夯沉量 $\leq 300 \text{ mm}$ 作为停夯标准；同时采用 1.5 m 小直径夯锤，增加强夯影响深度，经工程验证达到了设计要求。

6.3. 时间间隔的确定

强夯施工中，两遍夯击需保持合理间隔时间以确保土中超静孔隙水压力消散。间隔时长因土质而异：透水性良好的土层可连续作业；而淤泥质黏土地基因渗透性差、孔隙水含量高，常规需 14 天间隔以防形成橡皮土，具体时长宜通过试验确定。

鉴于本项目工期紧张，试夯阶段即委托检测单位开展超孔隙水压力监测。根据实测数据，最终优化确定：强夯置换两遍夯击最短间隔时间为 7 天，地基承载力验收检测间隔时间定为 28 天。该方案在保证工程质量的同时有效提升了施工效率。

6.4. 桩基塌孔问题

淤泥质黏土未被完全置换，对地基承载力和沉降没有太大影响，但对桩基还是带来了不少困扰。站址基岩层顶面起伏较大，桩长差异显著(9~30 m)。为验证不同条件下的桩基性能，设置两个试桩区：

- 试桩一区：无淤泥质黏土，仅对填方进行强夯处理，桩长均 < 12 m；
- 试桩二区：对淤泥质黏土强夯置换并处理填土，桩长均 > 25 m。

通过试桩，评估承载力特征值、桩侧负摩阻力及施工工艺可行性。

6.4.1. 长桩塌孔问题(桩长 > 18 m)

- 短桩施工(<18 m)：成孔顺利，效率高，质量稳定。
- 长桩施工(>18 m)：钻孔至约 18 m 时出现塌孔。

原因分析：试桩二区填方厚 13 m，强夯置换影响深度 5 m，合计 18 m。塌孔表明该深度以下仍存在未置换的淤泥质黏土层，钻机扰动后流塑变形导致塌孔，与强夯置换试验数据正好吻合。图 12、图 13 对比原始与强夯后土层。

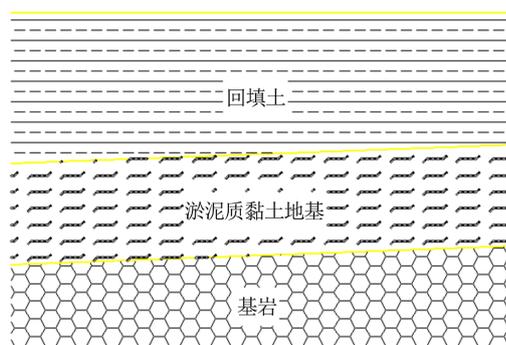


Figure 12. Original soil profile

图 12. 原始土层剖面

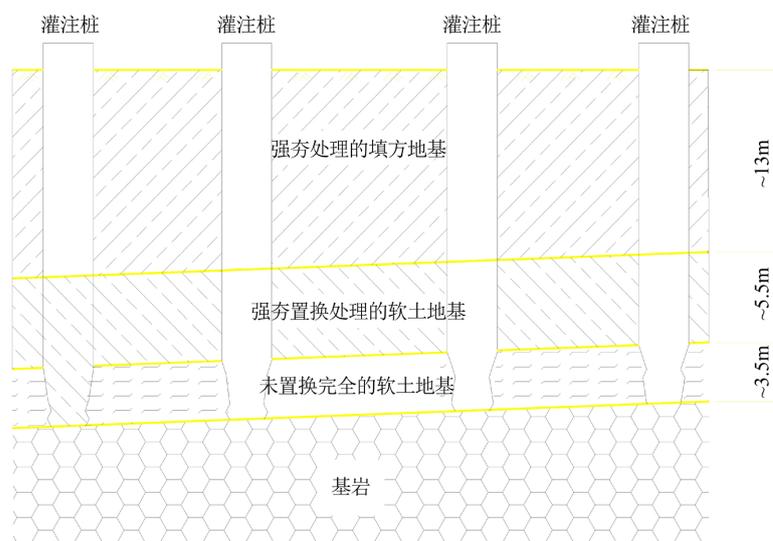


Figure 13. Soil profile after dynamic compaction treatment

图 13. 强夯处理后土层剖面

6.4.2. 解决方案

1) 泥浆护壁方案: 为防止孔洞坍塌, 成孔后立刻注入泥浆, 泥浆比重 1.25, 粘度 25 s, 同时桩孔顶部设置 2~4 m 护筒。但泥浆壁不能承受黏土压力, 成桩后, 通过桩身完整性检测, 发现仍有缩颈现象, 泥浆护壁效果不理想。

2) 高压旋喷桩加固方案: 高压旋喷桩即利用钻机将带有喷嘴的注浆管送至设计深度, 通过高压泵(通常 20~40 MPa)将水泥浆液高速喷射, 浆液与土颗粒强制搅拌混合, 形成水泥土固结体(旋喷桩)。采用高压旋喷桩加固地下未置换的淤泥质黏土地基, 再成孔浇筑桩基混凝土, 以避免塌孔现象。

在实际施工中, 由于土体孔隙较多, 高压泵喷射的浆液方向难以控制且扩散不均, 最终此方案失败。

3) 长护筒方案: 用沉管振动锤沉入 20 m 长钢护筒($\Phi 680 \times 12$ mm)穿透软土层至设计深度, 在管内钻孔、清孔, 安装钢筋笼, 再用导管灌注混凝土; 初凝后, 用振动锤拔出钢护筒。此方案试桩成功, 经检测桩体质量非常好。

采用长护筒方案, 混凝土充盈系数达到 1.6(常规 1.1~1.3), 混凝土用量增加 30%, 但质量可控; 采用低频液压振动锤沉筒、拔筒, 效率从 1~2 根/日提升至 7 根/日, 效率提高 250%。因此现场配置专用设备(钻孔机、液压振动锤、钢护筒), 保障施工进度。

最终本工程 > 18 m 的桩均采用长护筒方案施工, 全站 I 类桩占比达到 97%。成都东 1000 kV 变电站成为国内首个采用长护筒方案施工旋挖钻孔灌注桩的变电站, 成功解决长桩塌孔难题。

7. 结论

1) 成都东 1000 kV 变电站淤泥质黏土及高填方地基处理方案针对填方区建(构)筑物, 采用直径 $\Phi 600$ 旋挖钻孔灌注桩方案, 通过长护筒方案解决部分长桩塌孔问题, 提高施工效率, 确保桩基质量。

2) 采用强夯置换法处理淤泥质黏土地基, 单击夯击能 6000 kN·m, 夯点间距 3.5 m, 平均每夯点连续 15 击, 置换料采用站内开挖的中风化基岩, 停夯标准为最后两击夯沉量不大于 300 mm 且累计总夯沉量不小于 18 m, 夯后地基承载特征值达到 200 kPa。此方案是可行的。

3) 对于渗透性差的饱和淤泥质黏土地基, 强夯置换两遍夯击的间隔时间为 7 天, 地基竣工验收承载力检测间隔时间为 28 天; 强夯两遍间可连续夯击, 地基竣工验收承载力检测间隔时间为 14 天。

4) 站址区域雨水充沛, 而基岩存在遇水软化的特性, 故设计通过站外设置排洪沟、地下设置两条主盲沟和无数次盲沟、以及站区表面设置有组织排水系统等措施, 将站外坡地的表面雨水、地下径流以及站内雨水均通过有组织排水进行疏导, 避免雨水在站内滞留。

综上所述, 本文提出的地基处理方案在实际工程中均表现出色, 站区排水通畅, 且通过试验深入研究强夯置换设计参数, 为类似工程提供参考和借鉴。

参考文献

- [1] 王浪, 邓辉, 邓通海, 等. 泥岩耐崩解性和颗粒粒径相关性的试验研究[J]. 长江科学院院报, 2017, 34(8): 120-124.
- [2] 苏杭, 王云川, 王朗. 红高层泥岩崩解性试验研究[J]. 人民珠江, 2018, 39(11): 39-42.
- [3] 闫玉兴. 遂宁机场泥岩碎石土高填方地基沉降研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 成都理工大学, 2013.
- [4] 王胜杰. 砂泥岩混合料填筑体在湿化条件下的沉降特征研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 成都理工大学, 2015.
- [5] 李吉林, 郝敬国. 地基处理方案在特高压项目的应用[J]. 电力勘测设计, 2019(1): 4-6.
- [6] 张永宏. 泥岩质路基填筑材料强夯加固过程有限元仿真模拟分析[J]. 公路交通科技: 应用技术版, 2012, 8(2): 59-62, 72.
- [7] 何勇, 贺瑞, 陈建敏, 张朋朋. 泥岩高填方地基强夯设计及现场试验分析[J]. 四川理工学院学报(自然科学版), 2019, 32(4): 55-61.

-
- [8] 杨关, 余波, 张朋朋. 强夯半置换法在工程中的应用[J]. 电力勘测设计, 2015(5): 11-14.
- [9] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑地基处理技术规范: JGJ 79-2012 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [10] 中国工程建设协会标准. 强夯地基处理技术规程: CECS279: 2010 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2010.
- [11] 中华人民共和国电力行业标准. 复电力工程地基处理技术规程: DL/T 5024-2005 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2005.
- [12] 陈保国, 董佳竹. 软土地基上高填方刚性寒冬地基处理及设计原则[J]. 土木工程与管理学报, 2012, 29(9): 12-16.
- [13] 张咪, 常伟, 张玉明. 陕北±800 kV 换流站高填方湿陷性黄土地基处理方案研究[J]. 电力勘测设计, 2021(11): 11-17.
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑桩基技术规范: JGJ 94-2008 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- [15] 刘林田. 干作业机械旋挖桩在 1000 kV 荆门变电站的应用[J]. 电力建设, 2008, 29(3): 9-12.
- [16] 程慧阳. 强夯置换碎石墩在挡墙地基加固处理的应用[J]. 福建建设科技, 2022(5): 48-50+89.