

不良地基泵站的深基坑支护设计与施工

路洪波

(天津市水务规划勘测设计有限公司,天津 300204)

摘要:某新建泵站工程地质条件复杂,场区基坑最大开挖深度达 7.60 m,存在厚层杂填土与淤泥,且地水变幅大、岩溶发育,支护方案的选择对工程造价控制至关重要。为优选支护方案,本文对 SMW 工法、地下连续墙及“钻孔灌注桩+高压旋喷桩”复合支护方案进行了技术经济对比分析。工程实践表明:该复合支护体系成功解决了溶洞穴区施工难题,兼顾了钻孔灌注桩的支护刚度与高压旋喷桩的止水帷幕效果。本文成果可为类似不良地质条件下泵站深基坑的支护选型、方案比选及施工措施制定提供实践借鉴。

关键词:深基坑支护;钻孔灌注桩;不良地基;高压旋喷桩;内支撑

中图分类号:TU753

文献标志码:A

文章编号:1673-8993(2026)06-0049-05

doi:10.13402/j.gcjs.2026.06.066

Design and construction of deep foundation pit support for substandard pump stations

LU Hongbo

(Tianjin Water Planning Survey and Design Co., Ltd., Tianjin 300204, China)

Abstract: The engineering geological conditions of a newly constructed pump station are complex, with the maximum excavation depth of the foundation pit reaching 7.60 m. The site contains thick layers of miscellaneous fill soil and silt, as well as significant variations in groundwater levels and developed karst features. Therefore, the selection of the support scheme is crucial for controlling the project cost. To optimize the support scheme, a technical and economic comparative analysis of the SMW method, underground diaphragm walls, and the composite support scheme of “bored cast-in-place piles + high-pressure jet grouting piles” is conducted. Engineering practice has demonstrated that this composite support system has successfully addressed the construction challenges in karst areas, combining the support stiffness of bored cast-in-place piles with the waterstop barrier effect of high-pressure jet grouting piles. The results can provide practical reference for the selection of support types, scheme comparison, and construction measures for deep foundation pits at pump stations under similar adverse geological conditions.

Key words: deep foundation pit support; bored cast-in-place piles; poor foundation; high-pressure jet grouting piles; internal support

随着城区建筑密度与开发强度的持续增大,深基坑开挖对周边建(构)筑物、地下管线及周边环境的影响日益凸显,使得深基坑支护成为水利及岩土工程领域的重点难点。鉴于该类工程具有安全标准高、技术复杂、投资占比大及实施风险

高等特点,支护结构的合理选型与参数优化至关重要^[1-2]。

深基坑支护技术广泛应用于水利、建筑、市政及交通等土木工程领域。目前,常用的支护型式包括放坡开挖、高压旋喷桩、钻孔灌注桩、H

收稿日期:2025-09-30

作者简介:路洪波(1986—),男,高级工程师,从事水利工程设计研究工作。

型钢桩、SMW 工法桩、拉森钢板桩、复合土钉墙、地下连续墙及深层搅拌桩墙等^[3-5]。鉴于支护设计具有较强的场地依赖性,本文以某不良地基条件下的泵站深基坑工程为例,对比分析了多种适用方案,最终确定了钻孔灌注桩与高压旋喷桩相结合的支护方案,并详细论述了关键施工技术,以期类似工程提供借鉴。

1 工程地质与水文条件

1.1 工程概况

某排涝泵站位于辽宁省大连市近海区域,主要功能为承泄周边特色城镇涝水,属主干排涝河道的河口泵站。由于现状泵站规模不足,难以满足规划区域的排涝要求,亟需实施改扩建工程以提升区域排涝能力,保障防洪安全。本工程规模为 14 m³/s,基坑平面尺寸为 25.8 m×22.3 m;场地整平标高为 3.0 m,基坑底标高为 -4.60 m,最大开挖深度为 7.60 m。工程地质条件复杂,上部杂填土分布广泛,下部淤泥层深厚,地下水位变幅大且溶洞发育,属典型不良地基。

1.2 工程地质条件

场地地貌单元属海滩地貌,后经人工回填改造,地层结构较为复杂,自上而下顺序:①杂填土,主要由灰岩碎石、黏性土、生活垃圾及建筑垃圾组成,结构松散;①₁粉煤灰,由煤炭燃烧产物人工堆填而成;②淤泥质粉质黏土,其有机质含量较高,含少量贝壳碎屑,局部夹薄层细砂;③粉质黏土,含约 10% 的石英岩碎石及角砾;④₁强风化白云质灰岩,岩体风化剧烈,节理裂隙发育,岩芯呈块状、碎块状,岩体质量等级为 V 级;④₂中风化白云质灰岩,岩体风化中等,节理裂隙较发

育,岩芯呈块状、短柱状,岩体质量等级为 III 级;⑤溶洞(溶沟、溶隙),由白云质灰岩溶蚀形成,洞内多被黏土和角砾充填,呈湿~饱和、软塑~可塑状态。勘探揭露溶洞洞顶标高为 -12.42~-2.67 m,洞底标高为 -20.80~-4.80 m,洞顶埋深为 10.20~23.00 m,洞高为 0.50~5.70 m。

1.3 水文地质特征

场区地下水主要赋存于杂填土层及基岩裂隙中,类型为松散岩类孔隙水及基岩裂隙水。受海陆交互影响,地下水与海水存在密切的水力联系,水位受潮汐涨落显著影响。勘察期间实测地下水位埋深为 4.00~11.50 m,相应标高为 -4.8~1.70 m。

2 支护方案选型与优化设计

2.1 方案比选依据与参数

结合工程场地水文地质条件、周边建(构)筑物距离及地区施工经验,综合考虑安全性、可行性与经济性,拟定 SMW 工法、地下连续墙、钻孔灌注桩联合高压旋喷桩 3 种支护方案进行对比分析。鉴于基坑开挖深度及对环境影响的控制要求,确定本基坑安全等级为一级。

根据详勘报告,各土层物理力学参数如表 1 所示。

2.2 备选方案技术特征

(1) SMW 工法桩。该方法通过在水泥土桩内插入钢管桩、H 型钢或拉森式钢板桩,形成集受力与抗渗于一体的复合支护结构^[6]。其施工噪声低、对周边环境影

响小,且型钢可回收,经济性较好。但该方法产生的废弃泥浆需外运处理,且对土层适应性有一定局限,多用于开挖深度为 6~

表 1 各土层支护设计参数

编号	岩土名称	容重/ (kN·m ⁻³)	黏聚力 标准值/kPa	内摩擦角 标准值/(°)	层厚/m	层底标高/m
①	杂填土	17.5	10.0	12.0	3.60~14.10	-5.80~3.60
① ₁	粉煤灰	14.0	8.0	6.0	0.70~7.40	-10.40~-2.50
②	淤泥质粉质黏土	17.6	6.1	1.5	0.70~7.40	-10.40~-2.50
③	粉质黏土	20.0	30.0	18.0	0.70~14.80	-17.30~-5.40
④ ₁	强风化白云质灰岩	23.0	40.0	22.0	0.40~9.10	-18.7~-3.50
④ ₂	中风化白云质灰岩	26.7	80.0	30.0	0.50~7.00	-20.6~-3.50

7 m 的场地。

(2) 地下连续墙。通过液压抓斗成槽, 在地下浇筑形成连续钢筋混凝土墙体。该结构刚度大、防渗效果佳、变形小、对邻近建(构)筑物影响小, 适用于多种复杂地基条件^[6]。然而, 针对本工程场地土层有机质含量高、地下水具侵蚀性且与海水连通, 水位波动频繁, 加之下部岩溶发育, 需通过专项试验验证成槽可行性。此外, 该方案造价高昂, 难以满足经济性控制目标。

(3) 钻孔灌注桩联合高压旋喷桩。钻孔灌注桩通过机械成孔、下放钢筋笼及浇灌混凝土, 形成刚度大、稳定性好的支护结构, 施工无噪音且对周边环境的影响小, 但不具备挡水功能^[5]。高压旋喷桩则利用高压喷射注浆形成水泥土固结体, 搭接形成止水帷幕, 具有灵活性高、占地小、扰动小的优势, 但无法独立承担侧向土压力。二者结合, 前者提供支护刚度, 后者解决止水问题, 既能保障基坑安全, 又具备良好的经济性。

2.3 方案综合比选与确定

基坑支护方案的选择需严格遵循安全可靠、经济合理及施工可行的原则, 并结合场地周边环境与水文地质条件综合判定。针对该工程, SMW 工法虽施工工期短, 但在含块石地层中成桩难度大, 且分期施工易形成冷缝, 加之 H 型钢一次性投入成本较高, 总体经济性不佳。地下连续墙虽刚度大、防渗效果好, 但针对本场地基岩起伏大、岩溶发育且地下水与海水连通的复杂条件, 施工风险不可控, 且工程造价远高于其他方案, 难以满足投资控制要求。

相比之下, 钻孔灌注桩与高压旋喷桩相结合的方案适应性更强。该方案利用钻孔灌注桩提供强大的支挡刚度, 利用高压旋喷桩形成封闭的止水帷幕, 不仅能有效应对上部杂填土及下部岩溶发育的地质挑战, 还能规避高水位带来的施工隐患, 且工程造价相对最低。因此, 综合考虑地质适应性、止水效果及经济性, 工程最终选用钻孔灌注桩与高压旋喷桩相结合的支护方案。

2.4 推荐方案设计参数

经设计计算, 确定钻孔灌注桩 + 高压旋喷桩方案的主要设计参数: 1) 支护桩与排布。钻孔灌

注桩的直径为 1 000 mm, 桩中心距 1 600 mm。双排桩排距(即前排与后排桩中心距)为 3 000 mm。

2) 止水帷幕。高压旋喷桩直径为 600 mm, 桩间搭接长度为 200 mm。支护桩与高压旋喷桩的搭接长度亦为 200 mm。3) 支撑系统。混凝土内支撑腰梁截面尺寸为 600 mm × 600 mm, 共设置两道。第一道腰梁直接与顶冠梁连接并整体同浇筑; 第二道腰梁需与支护桩进行植筋处理, 并与混凝土斜撑一同浇筑。

3 复杂地层施工关键技术

3.1 施工分区与降水方案

鉴于场地地下水丰富, 且杂填土及粉煤灰层透水性好, 基坑开挖时涌水量大, 极易引发坍塌。常规“坑外降水 + 坑内明排”方案工程量大, 且难以形成有效的封闭降水漏斗, 无法保障干作业施工。因此, 必须采取针对性的降排水措施。

综合工程地质条件, 决定采用“外围封堵 + 坑内疏干”的治理思路: 首先利用高压旋喷桩在基坑外侧构筑竖向止水帷幕, 对杂填土、粉煤灰及淤泥质粉质黏土层进行全域封堵; 随后在坑内采用集水明排方式, 及时疏干基坑内部地下水。

由于基坑支护范围内人工填土及软土物理力学指标较低, 地质条件差, 支护与降水必须协同进行。根据基坑周边环境, 支护分区(图 1)如下: CDAB 段采用双排桩 + 旋喷桩 + 内支撑联合支护体系; BC 段采用单排桩 + 旋喷桩 + 内支撑联合支护体系。

3.2 施工顺序

3.2.1 CDAB 段施工流程

该区段施工严格遵循“先支后挖”原则, 具体流程如下。

(1) 施作双排钻孔灌注桩。

(2) 施工高压旋喷桩止水帷幕, 确保桩体咬合紧密。

(3) 施工双排桩冠梁及第一道混凝土内支撑。

(4) 分层开挖土方, 降至内撑标高后, 施工腰梁及相应内支撑。

(5) 待内撑达到设计强度并发挥作用后, 继续分层开挖至下道支撑标高, 重复上述工序, 直

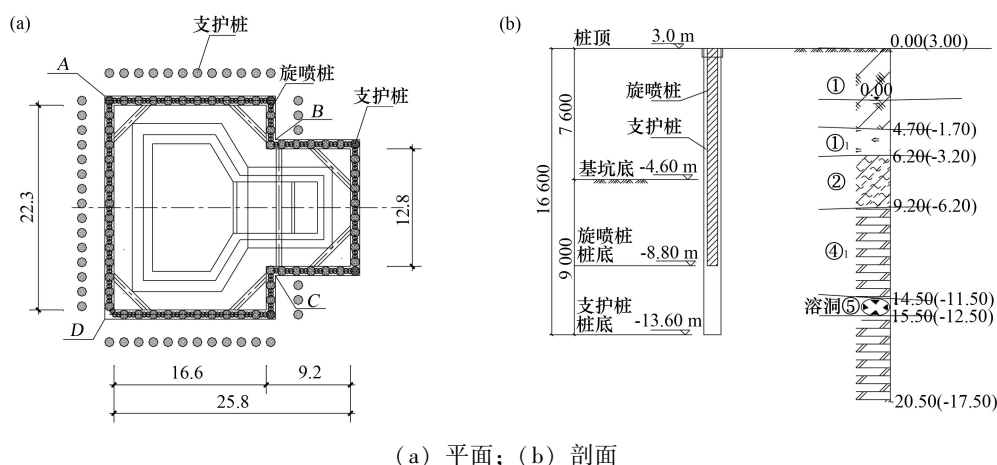


图 1 支护桩布置

至挖至基坑底。

(6) 施工全过程同步实施挂网喷混凝土及坑内降排水。

3.2.2 BC 段施工流程

该区段施工与 CDAB 段类似，具体如下。

- (1) 施工单排钻孔灌注桩。
- (2) 施工高压旋喷桩止水帷幕。
- (3) 施工单排桩冠梁及第一道混凝土内支撑。
- (4) 分层开挖土方至内撑标高，施工腰梁及内支撑。
- (5) 待内撑发挥作用后，继续分层开挖至基坑底。

(6) 全过程做好挂网喷混凝土及坑内降排水工作。

3.3 关键施工要点

3.3.1 钻孔灌注桩施工要点

(1) 测量定位：严格按设计坐标放线，复核桩中心距，桩位偏差不大于 20 mm。

(2) 垂直度控制：为确保与旋喷桩有效搭接，桩身垂直度偏差不大于 0.5%。

(3) 成孔工艺：采用冲击成孔。遇溶洞时，桩端需穿透溶洞，嵌入下部稳定基岩。

(4) 护壁措施：鉴于场区地质条件差，成孔过程采用钢护筒护壁，防止孔壁坍塌。

3.3.2 高压旋喷桩止水帷幕施工要点

(1) 工艺选型：为确保桩径满足设计要求，采用二重管法旋喷工艺。

(2) 垂直度控制：为保证与支护桩有效搭接，垂直度偏差不应大于 0.5%。

(3) 工艺流程：测量定位放线→钻机就位→钻架角度调整→钻孔至设计标高→封堵喷嘴→搅浆→由下向上旋喷→冲洗→移位。

(4) 孔位偏差：严格按设计孔位放线，标明孔号，孔位偏差不得大于 20 mm。

4 支护效果监测与验证

工程基坑监测主要针对围护桩水平位移及基坑周边地表沉降进行。根据《建筑基坑工程监测技术标准》(GB 50497—2019)，结合设计及施工经验，设定水平位移预警值为 25 mm，竖向位移预警值为 20 mm。现场监测数据如表 2 所示。由表 2 可知：各项指标均低于控制阈值。监测结果验证了该支护设计方案在技术上的合理性及施工过程的安全性，有效控制了基坑变形及周边环境风险。

表 2 监测数值与规定数值对比

监测项目	监测数	预警数值	差值
水平位移	13.5	25	11.5
竖向位移	8.6	20	11.4

5 结 论

(1) 对于近海岩溶发育区的深基坑工程，单纯依靠降水措施难以实现干作业施工。采用钻孔灌注桩与高压旋喷桩相结合的支护方案，既能适应基岩起伏较大的地质条件，又能利用止水帷幕有效切断海水补给通道，实现了技术可行性与经济性的最佳平衡。

(2) 全过程监测数据表明，该支护体系成功

将水平位移控制在 13.5 mm 以内。这一结果不仅验证了“双排桩 + 内支撑”体系在控制软土流变变形方面的有效性，也验证了该支护结构在复杂地层中具有足够的刚度与稳定性。

(3) 针对本工程特殊的地质条件，建议设计中严格控制桩端嵌入稳定中风化岩的深度不少于 1.5 倍桩径，以确保桩基获得可靠的端承力，同时通过深部锚固有效规避下部溶洞发育带来的塌陷风险。

参考文献：

[1] 杨青. 基坑工程中深基坑支护方案的设计[J]. 安庆

师范学院学报(自然科学版),2008,14(2):93-95.

[2] 沈治新,贾万鑫,宋国龙. 天津崇德园基坑支护工程技术[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2017,44(4):71-73.

[3] 何剑平. 地下连续墙在超深顶管井中的应用[J]. 特种结构,2018,35(5):79-82.

[4] 陈祖树. 岩土地质深基坑设计分析[J]. 西部探矿工程,2018,30(11):8-10.

[5] 路洪波. 杨晨光. 李大顺. 某城市综合管廊下穿河道段设计与施工[J]. 中国给水排水,2021,37(20):82-86.

[6] 刘福云;周启明;陈辉. 深基坑支护施工技术探讨:以湘雅五医院深基坑支护为例[J]. 工程建设,2024,56(10):56-61.