

滨海地区软土基坑降水技术研究

曹禹

(中国交通建设股份有限公司轨道交通分公司)

摘要:为解决沿海富水地区地铁车站基坑施工中地下水位高、土层渗透性差等问题,以天津地铁 11 号线某地铁站为背景,采用理论计算、现场试验等方法,提出软土基坑降水技术。通过设置 29 口坑内疏干降水井,结合抗突涌稳定性验算,设置 5 口坑内承压水井精准调控地下水。现场试降水结果显示,单井出水量稳定在 $0.8\sim 1.8\text{ m}^3/\text{h}$,群井疏水效果显著,水位在停止降水后恢复 $48\%\sim 67\%$ 。研究表明,该降水技术有效降低基坑突涌风险,提高施工效率,为滨海地区类似工程提供了可靠的技术参考。

关键词:滨海地区;软土基坑;降水技术;抗突涌稳定性

0 引言

随着城市轨道交通建设的快速发展,滨海富水地区的地铁车站基坑施工面临地下水位高、土层渗透性差等挑战^[1]。基坑降水作为关键环节,直接影响土方开挖进度、施工安全及周边环境稳定。在软土地层中采用传统的降水方法往往效果不佳,易引发基坑突涌、地面沉降等问题^[2]。因此,开发一种适用于滨海地区软土地层的基坑降水技术具有重要意义。

近年来,国内学者对滨海地区软土基坑降水技术进行了广泛的研究。王卫东等^[3]介绍了基坑降水的各种方法及其适用条件。以天津地铁 11 号线某地铁站为背景,针对复杂的地质水文条件,提出了一种针对性的基坑降水方案。通过合理布置疏干降水井、承压水井和观测井,结合抗突涌稳定性验算,实现了对地下水的精准调控。现场测试验证了此项技术的有效性,为类似工程提供了可靠的技术保障。

1 工程概况

天津某地铁站主体基坑呈矩形布置,开挖深度最大值达 18.902 m ,纵向延伸约 200 m ,横向跨度 25 m ,采用地下 2 层框架结构体系。基坑支护采用混凝土(钢)支撑与地连墙相结合的方式,地连墙厚度 800 mm 、深度 35 m ,场地地下水位高,且土层以软土为主。项目周边环境复杂,车站周边有重要的既有建筑,在基坑开挖过程中地下水控制对土方开挖进度、基坑稳定性等都有直接的影响。

1.1 地质条件

车站地层自上而下依次为人工填土层、多层陆相沉积层(第 I—V 陆相层)、海相沉积层(第 I—III 海相层),主要为填土、淤泥质土、黏性土、粉土及砂土。

场址浅层地下水储集于陆相 II 层与 V 层间的粉砂含水层中,属弱承压性第四系孔隙潜水含水系统。经水文地质分析表明,陆相 V 层以下的深层粉砂层地下水及承压水与浅层水体间无直接水力联系,其动态变化对浅层地下水系统影响可忽略不计。

1.2 重难点分析

综合项目的场地、工程地质和水文地质情况,本项目的降水存在较大的困难。

1) 根据本站提供的勘察资料及围护设计资料,在基坑开挖范围内分布有淤泥质粉质黏土,最大揭示厚度约 6.00 m 。淤泥质土作为典型软土介质,其工程特性表现为触变性显著、孔隙比高且含水率大、抗剪强度低、具有流变性、压缩模量低(通常小于 3 MPa)且固结速率缓慢、渗透性差。工程性质很差,对工程造成不利影响,如何保证该类土层疏干为本工程的重点及难点。

2) 本项目的止水帷幕已将第一层微承压水含水层隔断,该层含水层埋深在 $15.30\sim 29.70\text{ m}$ 之间,厚度在 $1.10\sim 4.30\text{ m}$ 之间,且含水量较为丰富。基坑底板已经接触到第一层承压水,井底已深入该承压水层。这使得本项目的疏干水量较大,成为疏干降水的难点之一。

3) 鉴于第二承压水层未被有效阻断,坑内外仍存在水力交换路径,持续抽水作业将引发坑外水位显著波动。如何通过技术方法抑制降水对周边水位的扰动效应,是本工程的攻关难点。

4) 在基底以下存在第二承压水层,结合断面图及降水井的设置深度,存在一定的突涌风险,需要进行抗突涌验算,合理有效地控制未隔断部分的承压水,是项目重点考虑的问题。

5) 检验基坑围护结构的施工质量,在相关含水层对应位置是否存在渗漏也是本工程降水的重点工作。

2 基坑降水设计思路

本工程降水设计思路主要结合工程地质及基坑围护结构的设计,坑内设置降水井、坑外设置一定数量观测井相结合的方式,以便对坑内外的水位及时掌控。应对以上重难点,降水思路为:

1) 依据 JGJ 120—2025《建筑基坑支护技术规程》要求,针对潜水含水层富水性特征,在基坑布置管井降水系统,实施超前降水,预降水周期满足 20 d 以上,以实现土体有效脱水^[3]。在开挖过程中,对于渗透系数较差的淤泥质土层,难以实现有效干燥,因此随着开挖,需要采取明排措施,以保证开挖面的正常进行。

2) 本项目围护结构未隔断第二承压水层,需考虑该层水突涌风险,需进行第二承压水层抗突涌验算,并结合验算结果确定减压井的设置。

3) 为更好验证围护结构的施工质量,同时加强对周边环境的保护,在坑外设置潜水和各层承压水的观测井,特别是基坑周边环境较为复杂的地方及施工过程中地连墙质量控制薄弱的地方。通过观测坑外水位的变化以指导坑内降水,同时通过坑外各层观测井水位变化情况,判断坑内外水力联系及含水层之间的水力联系。

3 基坑降水方案计算

3.1 疏干井的数量计算

3.1.1 疏干总涌水量的估算

结合地质条件分析,本基坑内土体主要为潜水含水层。疏干井的涌水总量主要由开挖土体的容量和降水过程中的补给量 2 个部分组成。即:

$$Q_{\text{总}} = Q_{\text{容积}} + Q_{\text{补给}} \quad (1)$$

$$Q_{\text{补给}} = Q_{\text{降雨}} + Q_{\text{越流}} \quad (2)$$

$$Q_{\text{容积}} = \sum \mu \cdot V \quad (3)$$

式中: $Q_{\text{总}}$ 为总涌水量, m^3 ; $Q_{\text{容积}}$ 为容积储存量, m^3 ;

$Q_{\text{补给}}$ 为外部补给量, m^3 ; $Q_{\text{降雨}}$ 为降雨补给量, m^3 ; $Q_{\text{越流}}$ 为越流补给量, m^3 ; μ 为含水层的给水度,参考《基坑工程手册》^[1],淤泥质土层 $\mu < 0.02$,粉砂层 $\mu = 0.05 \sim 0.06$,粉质黏土层 $\mu = 0.03 \sim 0.045$; V 为含水层体积, m^3 。

根据本工程勘察资料,给水度及各土层厚度见表1。

表 1 给水度及各土层厚度数据表

土层编号	土层名称	给水度 μ	土层厚度/m
① ₂	素填土	0.10	2.1
④ ₁₁	黏土	0.02	—
⑥ ₁	粉质黏土	0.04	3.9
⑥ ₂	淤泥质粉质黏土	0.01	—
⑥ ₄	粉质黏土	0.04	6.7
⑦ ₂₃	砂质粉土	0.05	1.5
⑧ ₂₄	粉砂	0.06	1.4

注: 给水度 μ 值为天津地区经验取值。

1) 容积储存量

结合表 1 与式(3), 容积储存量为:

$$Q_{\text{容积}} = \sum \mu A h \quad (4)$$

式中: A 为基坑总面积, 约 $6\,089\text{ m}^2$; h 为基坑降水深度, m , 按照方案要求降到基坑底以下 1 m 。

计算得 $Q_{\text{容积}} = 4\,810.3\text{ m}^3$ 。

2) 补给量

①越流补给量

$$Q_{\text{越流}} = A k (\Delta h / L) t \quad (5)$$

式中: k 为潜水含水层与第二承压含水层之间弱透水层的垂向渗透系数, m/d , 参考工程经验取值为 0.005 ; Δh 为承压含水层水头差, m ; L 为渗流路径, m ; t 为疏干降水时间, d 。

结合勘察设计资料, 基坑面积约 $6\,089\text{ m}^2$, 水头差为 10.79 m , 渗流路径约 20 m , 按照 20 d 的疏干降水计算越流补给量 $Q_{1\text{越流}} = 698\text{ m}^3$ 。

②降雨补给量

结合基坑内土质的透水性较弱的因素, 降雨基本采用明排措施排出, 渗水量较少, 因此不予考虑。

3) 总涌水量

由于越流的补给, 基坑总涌水量随着施工周期增加而增加。结合施工经验, 疏干井需要提前 $15 \sim 20\text{ d}$ 开启。本项目计划提前 20 d 开启, 基坑总涌水量为: $Q_{\text{总}} = Q_{\text{容积}} + Q_{\text{补给}} = 5\,508.3\text{ m}^3$ 。

3.1.2 单井涌水量确定

本项目采用 QDX3-25-0.75 型流量为 3.0 m³/h 的潜水泵，其出水能力最大为 3.0 m³/h，因基坑多为粉质黏土，渗透性较差，无法达到 3.0 m³/h 的出水能力，依据以往类似工程经验，单井平均出水量取 10~15 m³/d。

根据 DB 29-202—2010《建筑基坑工程技术规程》相关计算公式^[4]得出，降水井数 $N=22.03$ 口。考虑地铁车站的基坑形状，为保证降水效果，实际布置 29 口降水井。按照面积法验算：基坑总面积/布置数量=单井控制面积，经计算得单井控制面积为 209.9 m²，满足单井经验控制面积。

本项目开挖区域存在较厚淤泥质土层不易疏干，疏干降水效果较差，需尽量延长降水时间，提前开始降水。

3.2 基坑抗突涌稳定性验算

根据《建筑基坑支护技术规程》，基坑开挖过程中需重点监测承压水顶托力与覆土压力的动态平衡，采用有效应力原理建立水土合算模型^[3]。当基坑开挖临近基坑底部时，承压水顶托力可与覆土压力达到临界值，有基坑失稳的风险，见图 1。因此，开挖前需要考虑承压水顶托力和覆土压力关系，根据开挖进度，及时采取开启承压水井等

降压措施，防止基坑突涌。

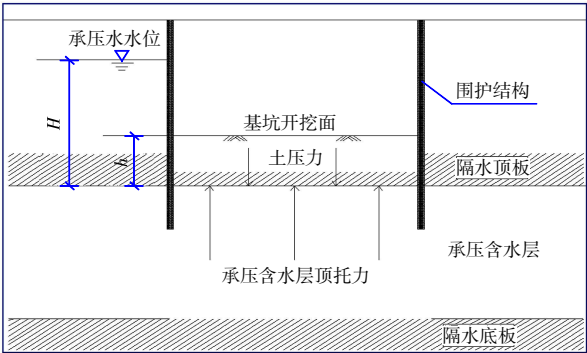


图 1 基坑底抗突涌示意图

考虑安全系数的同时，覆土压力应大于承压水顶托力，即：

$$\Sigma h \cdot \gamma_s > F_s \cdot \gamma_w \cdot H \tag{6}$$

式中： h 为基坑底至承压含水层顶板间各土层厚度，m； γ_s 为基坑底至承压含水层顶板间各层土厚度加权平均重度，kN/m³； H 为承压水水位高于承压含水层顶板的高度，m； γ_w 为水的重度，kN/m³，取 10； F_s 为安全系数，本场地取 1.1。

参考勘察数据，第二承压水水位取绝对标高 -4.81 m。土的重度按照平均值约 19.5 kN/m³。本项目基坑抗突涌安全系数计算结果见表 2。

表 2 抗突涌安全系数计算结果

含水层	开挖部位	开挖面绝对标高/m	承压含水层顶托力/kPa	水位降深/m	水位标高/m	临界开挖标高/m
第二承压水 第一亚层	小里程端头井	-16.359	222.20	4.86	-9.67	-13.6
	标准段	-15.616(落深区域)	222.20	3.55	-8.36	-13.6
	大里程端头井	-15.829	239.03	2.70	-7.51	-14.3
第二承压水 第二亚层	小里程端头井	-16.359	240.68	3.60	-8.41	-14.3
	标准段	-15.616(落深区域)	254.65	1.30	-6.11	-14.9

本基坑围护结构未完全隔断第二承压水层，根据基坑抗突涌验算，第二承压水第一亚层安全系数为 0.84~0.96，需要减压降水；第二承压水第二亚层部分区域安全系数为 0.9~1.04，略小于控制系数 1.1，主要考虑采取坑外观测为主备用为辅措施。

根据以上分析计算，考虑在基坑内设置部分第二承压水第一亚层备用兼观测井；对于第二承压水第二亚层考虑在坑外设置备用兼观测井，时时观测承压水水头变化趋势，根据需要按需减压降水。

3.3 降水井布置

综上，确定将 29 口降水井布置在坑道中。根据工程监测需求，为全面掌握疏干降水对承压水系统的动态影响，仍需在基坑内布置 5 口第二承压水专项观测井及应急减压井组。该监测体系不仅可实时追踪承压水位变化特征，还可通过应急调控功能保障工程安全。

4 现场试降水及数据分析

4.1 单井试验

分析 J2-3 降水井的数据，初始测得出水量约 1.8 m³/h，运行趋于稳定后，疏干井出水量呈现持

续衰减趋势,最终稳定趋于 $0.8 \text{ m}^3/\text{h}$, 动水位埋深值趋于 20.0 m 的控制目标, J2-3(降水井)、J2-4(观测井)、J1-17(观测井)水位变化见图 2。监测数据显示:坑外浅层水位监测点未出现显著波动,

第一、第二承压含水层观测井水位保持稳定状态。通过分析水位控制参数,当前疏干降水体系已形成有效水位控制屏障,水位控制效果显著,同时围护结构完整性良好,未发现异常渗漏。

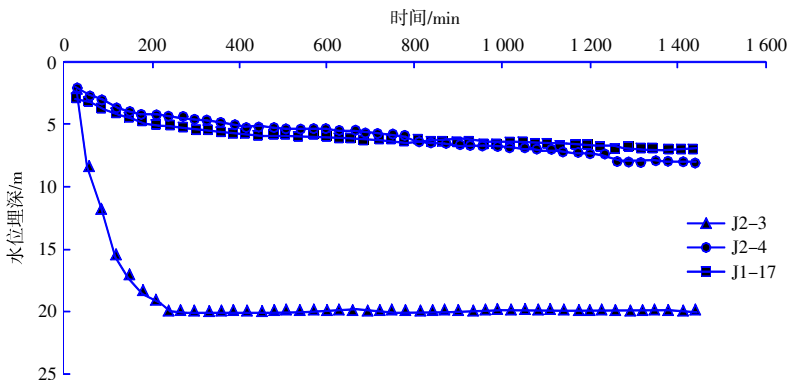


图 2 单井试验水位变化曲线

4.2 群井试验

根据群井试验监测数据,试验基坑内疏干井动水位标高呈现稳定态势,实测值维持在 $-19.15 \sim -21.32 \text{ m}$ 区间范围内。疏干系统运行初期,单井出水量测量值为 $1.1 \sim 1.4 \text{ m}^3/\text{h}$,随着水位逐步逼近设计控制值,出水量呈现出递减趋势,最终的测量数据稳定在 $0.2 \sim 0.5 \text{ m}^3/\text{h}$ 。如图 3 所示, J1-7 (-17.12 m)、J1-13 (-17.05 m)、J2-1 (-18.05 m)、J2-3 (-18.25 m) 的水位埋深数据表明,当前水位控制已满足小里程段、标准段及大里程段不同区段的开挖深度需求。

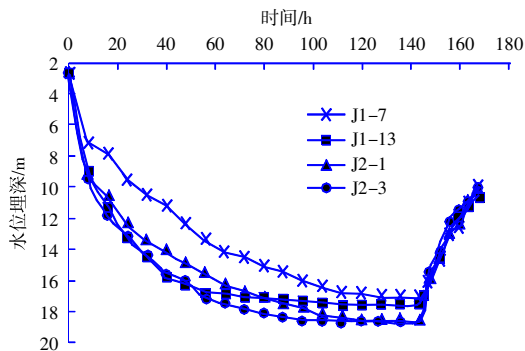


图 3 群井试验水位变化曲线

结合数据可得:第一含水层与第二含水层间存在显著水力联系;坑外监测井水位动态变化趋于平稳。经 24 h 降水井停抽验证,水位恢复效率达到 $48\% \sim 54\%$,承压井水位回升速率处于 $61\% \sim 67\%$ 的动态区间。

5 结语

1) 坑外观测井水位稳定,表明围护结构施工质量良好,无明显渗漏现象,有效隔断了基坑内外的水力联系,保障了降水效果和基坑周边环境安全。

2) 组井抽水时,满足了坑内静态水位观测井最终水位要求,为基坑开挖创造了良好的无水作业条件。

3) 根据资料分析,开挖至临街开挖标高时,复核第二承压水水位,如坑内承压水观测井水位不满足安全水位要求可考虑减压降水,保证基坑稳定性。

4) 组井试验结果表明,基坑降水方案中井位布置及参数设置合理,整体疏干效果良好。

5) 停止抽水后,坑内降水井水位恢复符合要求,表明降水系统运行平稳,停止抽水后地下水仍能保持相对稳定,有利于后续施工过程的衔接,有利于周围建筑物长时间保持稳定。

通过本次基坑降水技术的研究与应用,在富水地区开挖基坑的施工难度有效降低,同时也验证了围护结构的施工质量,为后续类似工程的水文地质分析提供了参考。

参考文献:

- [1] 王卫东,翁其平. 基坑工程手册[M]. 中国建筑工业出版社,2017.
- [2] 李广信,张丙印,于王贞. 土力学[M]. 清华大学出版社,2013.
- [3] JGJ 120—2025,建筑基坑支护技术规程[S].
- [4] DB 29—202—2010,建筑基坑工程技术规程[S].