

富水区地铁深基坑降水方法研究

孙腾云¹ 刘晨曦²

1.南昌轨道交通集团有限公司, 江西 南昌 330013

2.大连海事大学交通运输系, 辽宁 大连 116026

[摘要]富水地层条件下地铁深基坑降水设计面临参数不确定性强、沉降控制要求高等技术难题。文中以南昌地铁某车站深基坑工程为研究对象,采用理论计算与FLAC^{3D}数值模拟相结合的方法,系统研究了不同降水方案对基坑降水效果及地层沉降的影响。以过滤器半径为变量设计了五种降水方案,从孔隙水压力变化、地表沉降响应、经济性、环境影响及施工可行性五个维度进行综合评价。结果表明:五种方案均能在15天内满足降水要求;随着过滤器半径增大、井数减少,地表最大沉降由28.5mm增至33.5mm,差异沉降由0.12mm增至0.24mm,均满足规范要求;综合加权评分显示,过滤器半径0.4m、井数22口的方案综合得分最高,为优选方案。研究成果可为类似富水地层基坑降水设计提供参考。

[关键词]深基坑;降水设计;富水地层;数值模拟;

DOI: 10.33142/aem.v8i7.20320

中图分类号: TU473.3

文献标识码: A

Research on Precipitation Method for Deep Foundation Pit of Fushui District Subway

SUN Tengyun¹, LIU Chenxi²

1. Nanchang Rail Transit Group Co., Ltd., Nanchang, Jiangxi, 330013, China

2. Department of Transportation Engineering, Dalian Maritime University, Dalian, Liaoning, 116026, China

Abstract: The design of subway deep foundation pit dewatering under rich water geological conditions faces technical challenges such as strong parameter uncertainty and high requirements for settlement control. This paper takes a deep foundation pit project at a certain station of Nanchang Metro as the research object, and uses a combination of theoretical calculation and FLAC^{3D} numerical simulation to systematically study the effects of different dewatering schemes on the dewatering effect of the foundation pit and the settlement of the geological strata. Five precipitation schemes were designed with filter radius as a variable, and comprehensive evaluations were conducted from five dimensions: changes in pore water pressure, surface subsidence response, economy, environmental impact, and construction feasibility. The results indicate that all five schemes can meet the precipitation requirements within 15 days; As the radius of the filter increases and the number of wells decreases, the maximum surface settlement increases from 28.5mm to 33.5mm, and the differential settlement increases from 0.12mm to 0.24mm, both of which meet the requirements of the specifications; The comprehensive weighted score shows that the scheme with a filter radius of 0.4m and 22 wells has the highest comprehensive score and is the preferred scheme. The research results can provide reference for the design of foundation pit dewatering in similar water rich strata.

Keywords: deep foundation pit; precipitation design; rich water formation; numerical simulation

引言

深基坑工程中的降水作业通常在开挖前启动,并贯穿整个施工过程。合理的降水设计不仅关系到基坑开挖的顺利实施,还直接影响周边地层稳定性及地表沉降控制效果。传统降水设计方法主要基于基坑涌水量与单井出水能力的理论计算,并结合土体渗透系数等经验参数确定降水井布置方案。然而,由于渗透系数等关键参数具有较强的不确定性,单纯依赖经验取值往往难以准确反映实际工程条件。

在降水过程中,地下水位的下降将引起土体有效应力增加,从而导致地层固结沉降。若降水参数设计不合理,例如降水井数量过多或过滤器长度过大,可能引发过度抽水及不均匀沉降;反之,则可能导致降水深度不足,无法满足施工要求。因此,在降水设计过程中,有必要结合现场监测数据对设计方案进行动态修正与优化。国内有关地铁车站深基坑降水方法研究,在城市地下空间开发日益广泛以及富水地层工程建设情况下,由以往单纯依靠经验发

展到现今理论分析及数值模拟相互结合过程。罗荣等^[1]结合实际工程情况提出一种新的降水方法设计思路,在复杂地质条件下,考虑土体非均质性和地下水补给条件合理确定降水方案,提高方案可行性和经济性。蔡惠华^[2]针对邻江软土地层,提出结合当地气候条件的降水设计方案并且在实际工程中证明其能够有效防止基坑变形;张国龙等^[3]就大体量泵站基坑工程,对降水方案进行研究分析认为科学设置井点布置以及合理选择抽水量可以明显提高降水效率同时减少施工风险;陈松等^[4]利用数值方法进行深基坑降水方案优化研究,得出不同参数变化对于降低地下水位的影响程度。何蕃民等^[5]针对临河富水砂卵石层开展高渗透地层中降水方案的研究工作,认为止水帷幕和降水系统相互配合是必要的。

本文以南昌地铁某车站深基坑工程为研究对象,在分析场地水文地质条件的基础上,通过理论计算与 FLAC^{3D}数值模拟相结合的方法,对不同降水方案进行系统研究,并结合地表沉降与孔隙水压力变化规律对方案进行综合评价,以期类似富水区基坑降水设计提供参考依据。

1 工程概况

1.1 工程基本信息

南昌地铁二号线城南大道车站深基坑工程整体沿东西方向布设。车站有效站台中心里程处轨面高程为 4.300m,标准段基坑宽度为 22.7m,场地整平后地面高程约 21.785m。轨面至底板面的垂直距离为 0.58m,底板厚度取 0.9m,垫层厚度为 0.2m,据此可知标准段基坑开挖深度约为 19.165m。车站周边场地条件相对开阔,施工方法以明挖法为主,局部区域结合盖挖法实施。本站总体采用明挖顺筑施工工艺,基坑支护结构形式为地下连续墙与内支撑相结合的支护体系。

1.2 工程地质

根据场地内揭示地层的地质年代、成因类型、岩性特征及风化程度等工程地质属性,可将本场地岩土层划分为五类,分别为:①填土;②粉质黏土;③砾砂;④强风化泥岩;⑤中风化泥岩。各土层(岩层)具体特征如下:

①人工填土:该层属人工回填形成,整体以灰褐色为主,土体较干,结构较松散,主要由黏土及卵石等组成,层厚一般为 1.2~3.0m。②粉质黏土:该层土体颜色多呈黄褐色,整体以可塑状态为主,局部表现为硬塑状态,具有较高的干强度和中等韧性,层厚约为 3.5~5.0m。③砾砂:该层多呈灰黄色或黄色,土体一般处于饱和、中密状态,主要矿物成分包括石英、云母及长石,颗粒圆度较好,但级配较差,局部夹有圆砾,厚度一般在 7.0~10.0m 之

间。④强风化泥岩:本层以紫红色为主,节理裂隙较发育,岩芯多表现为碎块状及短柱状。岩体遇水后易发生软化和崩解,手掰即可折断,整体完整性较差,属破碎岩体,层厚约为 3.0~5.0m。⑤中风化泥岩:该层主要为中风化泥质粉砂岩,颜色多为暗红色或紫红色,具粉砂质结构和中厚层状构造,以泥质胶结为主,节理裂隙较为发育。岩芯多呈柱状和长柱状,少量为短柱状。岩石遇水易软化,风干后易开裂,未见洞穴、临空面、构造破碎带及更软弱岩体分布,该层厚度一般为 20.0~30.0m。

车站基坑土层基本物理力学指标如表 1 所示。

表 1 车站基坑土层物理力学指标

土层	厚度 (m)	弹性模量 (MPa)	泊松比	粘聚力 (kPa)	重度 (kN/m ³)	内摩擦角 (°)
素填土	2	6	0.32	8	18	10
粉质粘土①	4	20	0.35	24	19.2	15
粉质粘土②	3	22	0.35	26	19.5	17
砾砂	10	35	0.28	2	20.5	34
强风化泥质粉砂岩	3	180	0.30	60	22.5	28
中风化泥质粉砂岩	22.5	450	0.26	150	23	34

1.3 水文地质

本车站场地附近的地表水体主要为五干渠一分渠。车站深基坑所在地区地下水主要以上层滞水、松散岩类孔隙水及碎屑岩类孔隙水为主。孔隙水主要为第四系孔隙水,场地内砾砂层厚度大,层间孔隙水主要为潜水,水量与水位相对稳定。场地砾砂层渗透系数 K 约为 60~80m/d,地下水补给充足,属于典型富水地层条件。

场地下伏基岩中的裂隙水主要属于混合型,含水性较弱,渗透系数一般为 0.26~0.45m/d。该层地下水与上覆孔隙水之间存在一定程度的水力联系,但通常并不存在连续统一的地下水位面。根据南昌地区地下水勘测报告,红层含水层与第四系含水层之间具有较强水力联系,第四系地下水可接受来自红层地下水的越流补给。本工程场地以孔隙水为主导,对基坑降水设计提出了较高要求。

2 基坑降水方案基本参数设计

在基坑降水与开挖施工过程中,地层固结变形通常是引起地表沉降的主要因素。当场地不存在承压水时,降水漏斗影响范围内地下水位的持续下降会导致土体发生固结,从而造成地面下沉。因此在基坑降水方案设计时,除了考虑是否能达到基坑底部降水要求之外,场地内的地面固结沉降大小也是不可忽略的主要因素之一。

2.1 降水井类型确定

通过对场地水文地质条件的系统分析可知,车站深基坑所在区域的主要含水层为厚度约 10m 的砾砂层。在基坑开挖作业过程中,地下水呈现无压流动状态。现场勘查结果表明,砾砂含水层的底板埋深达到 19m,该底板下方分布着强风化泥岩,其渗透系数较低,属于弱透水层范畴,在进行相关计算时可将其当作隔水底板处理。综合上述各项条件,本次基坑降水井的类型确定为潜水完整井。

2.2 降水井深度计算

降水井深度的设计需要系统考虑多个影响因素:目标降水深度、含水层的空间分布特征、地下水类型、降水设备性能参数、降水期间地下水位动态变化幅度等。具体井深可通过公式(1)进行定量计算确定。

$$H=H_{w1}+H_{w2}+H_{w3}+H_{w4}+H_{w5}+H_{w6} \quad (1)$$

式中: H_{w1} 为基底深度(m); H_{w2} 为基底水位(m),取值为 2m; H_{w3} 按照 $i r_0$ 取值,为水力坡度,在降水井分布范围内宜为 1/10, r_0 为降水井分布范围的等效半径或降水井排间距的 1/2 (m); H_{w4} 为降水期间的水位变化幅度,取 1.5m; H_{w5} 为降水井过滤器工作长度,取值为 3m; H_{w6} 为沉砂管长度(m),取值为 2m。

根据基坑基本工程概况,本基坑长 204m、宽 21m,按不规则圆形近似计算,降水井等效半径 $r_0=\sqrt{A/\pi}=37\text{m}$ 。经计算,降水井实际长度 $H_w=30.5\text{m}$,未穿透隔水层,进一步验证了潜水完整井的判定。

2.3 基坑涌水量计算

基坑总涌水量采用潜水完整井公式(2)进行计算:

$$Q=\pi k \frac{(2H-s)s}{\ln(R/r_0)} \quad (2)$$

式中: H 为含水层厚度(m); s 为设计降深(m); R 为影响半径(m); r_0 为基坑等效半径(m); K 为渗透系数(m/d)。

土层综合渗透系数采用厚度加权平均法计算,得 $K=52.75\text{m/d}$ 。基坑影响半径按式(3)计算:

$$R=2s\sqrt{KH} \quad (3)$$

经计算,含水层厚度 $H=19\text{m}$,设计降深 $s=21\text{m}$,影响半径 $R=1629\text{m}$,基坑总涌水量 $Q=16518\text{m}^3/\text{d}$ 。具体计算成果如表 2 所示。

2.4 基坑降水方案设计

单井出水量按式(4)计算:

$$q_0=120\pi\tau_s l^3 \sqrt{K} \quad (4)$$

式中: q_0 为单井出水能力(m^3/d); τ_s —降水井过滤器半径(m); l 为降水井过滤器长度(m); K —含水层渗透系数(m/d)。

在砂卵石地层中进行基坑降水井施工时,过滤器半径的选择需兼顾单井出水能力和地层稳定性。增大过滤器半径通常需要同步扩大钻孔孔径,然而砂卵石地层结构松散,钻孔过程中极易发生塌孔。综合考虑地质条件与出水效率需求,将过滤器半径控制在 0.2~0.4m 范围内。本工程基坑长度 204m、宽度 21m,降水井距离基坑边缘取 3m。

本文采用控制变量法,固定过滤器长度,以过滤器半径为主要变量构建五种降水方案,具体参数如表 3 所示。

表 2 车站涌水量计算结果

渗透系数 K (m/d)	含水层厚度 H (m)	设计降深 s (m)	基坑长度 l (m)	基坑宽度 b (m)	基坑面积 A (m^2)	等效半径 r_0 (m)	影响半径 R_0 (m)	涌水量 Q (m^3/d)	降水模型
52.75	19	21	204	21.6	4406.4	37	1629	16518	潜水完整井

表 3 降水方案设计

方案选择	过滤器半径 r_0 (m)	单井出水能力 q_0 (m^3/d)	水泵额定流量 (m^3/d)	降水井数量	降水井间距 d (m)
方案一	0.2	844	820	23	18.6
方案二	0.25	1055	1020	28	23.7
方案三	0.3	1266	1220	15	28.5
方案四	0.35	1447	1430	13	32.9
方案五	0.4	1688	1600	12	35.6

3 降水方案的数值模拟

3.1 模型建立

基于 FLAC^{3D} 建立三维渗流-应力耦合模型。研究区域土体划分为 6 个地层：素填土、粉质粘土①、粉质粘土②、砾砂、强风化泥质粉砂岩、中风化泥质粉砂岩。模型长度取基坑长度的 2 倍，宽度取基坑长度的 5 倍，竖向范围 44.5m，共包含 125581 个单元格。

在边界条件设置方面，模型侧面限制水平位移，底部限制竖向位移，地表设置为自由边界。根据场地水文地质条件分析，降水影响半径约为 1500m，远大于模型尺寸，因此将模型边界统一视为不透水边界。

在本构关系选取方面，岩土体采用摩尔-库伦模型，渗流场采用各向同性渗流模型。模型所采用的各土层参数与表 1 一致。

3.2 模拟结果分析

3.2.1 孔隙水压力变化

在基坑中心位置距离底面 10m 处设置监测点，五种方案的模拟过程中监测点处的孔隙水压力变化情况如图 1 所示。图中的孔压变化曲线可以表示水位线的变化，因为孔压 $P=\rho gh$ ，其中 ρ 、 g 为固定值，孔压只与 h 有关。

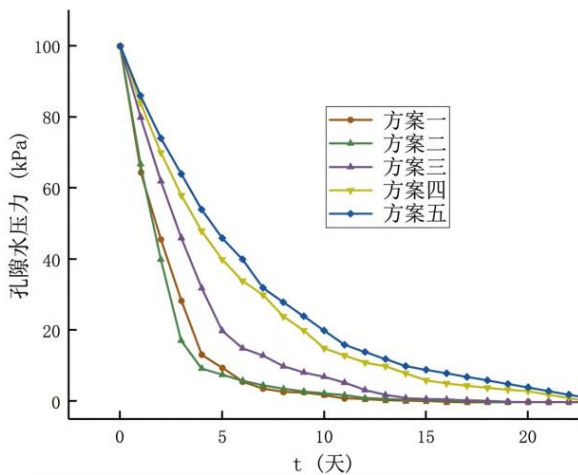


图 1 五种方案孔隙水压力变化情况

从五种方案变化曲线可以看出，孔压初期下降速率较快，是因为降水开始时影响半径较小，在抽水量一定的情况下水位降低较快。随着降水井的持续抽水，影响半径持续增大，水位下降变慢，最终降水井抽水量与流入基坑的水量达到平衡，水位下降达到稳定值。

五种方案的监测点孔压均降到了零，说明监测点处达到了降水要求。尽管各方案孔隙水压力降至零所用的时间并不一致，但均在 15 天内完成，说明五种方案均可满足降水基本任务。

3.3.2 地表沉降对比

在基坑降水过程中，由于孔隙水压力的减少，土体会产生固结沉降，由此引发的地表沉降是实际工程中不可忽视的安全问题。不同降水方案地表沉降云图如图 2 所示。

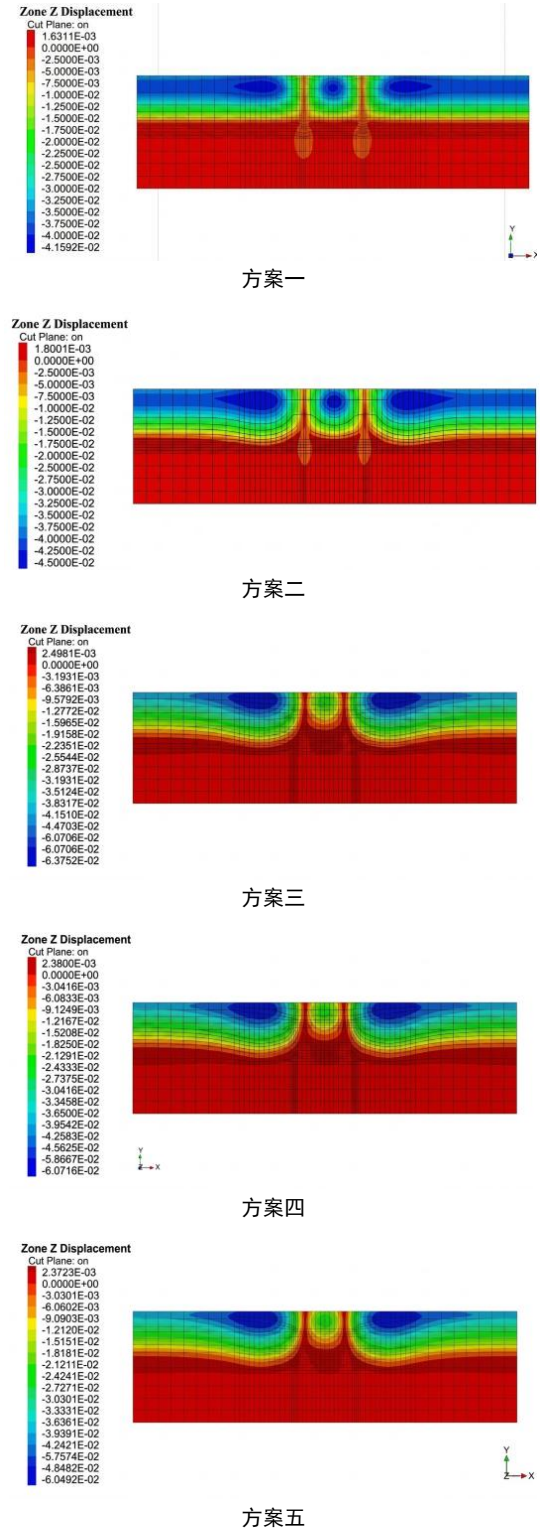


图 2 不同降水方案地表沉降云图

由图 2 可知,五种降水方案下的地表沉降云图整体分布规律基本一致,均呈现以基坑中心为对称轴的槽形沉降特征,最大沉降主要集中于基坑两侧邻近区域,并随距离基坑边缘的增大逐渐衰减。这一规律与基坑降水引起的地下水位下降及土体固结变形机制相一致。

不同方案在沉降幅值上存在一定差异。随着过滤器半径增大及降水井数量减少,单井抽水强度增强,地表沉降值呈逐步增大趋势。方案一井数较多、单井出水量较小,沉降分布平缓,最大沉降约 28.5mm;方案五沉降集中趋势较明显,最大沉降约 33.5mm。从空间分布角度分析,各方案沉降影响范围差异不大,沉降曲线整体平滑,未出现突变现象。各方案最大沉降值均控制在规范允许范围内,满足工程安全性要求。

4 多指标综合比选

4.1 经济性分析

从经济性角度分析,评价内容主要包括降水井施工费用、水泵设备购置及运行成本、施工周期等。由表 4 可知,随着过滤器半径的增大,单井施工成本虽有所上升,但由于降水井数量显著减少,总体施工成本呈下降趋势。方案五过滤器半径为 0.4m,总施工费用降至 158.4 万元,较方案一降低约 18.1%。方案五在经济性方面表现最优。

4.2 环境影响分析

本工程敏感区内包含既有地下管线及一栋 6 层砖混

结构建筑。各方案在敏感区域的最大沉降值均小于 40mm,差异沉降均小于 0.3mm,满足规范控制要求。各方案影响半径总体差别不大,方案五降深曲线相对平缓,周边含水层水位变化较为均匀,有利于减缓局部水位骤降引起的不均匀地层变形。

4.3 施工可行性分析

本工程基坑长约 204m、宽约 21m,场地空间较为有限。方案一井数较多,井间距仅为 18.6m,施工期间设备交叉作业频繁,现场交通组织和设备协调难度较大;而方案五井间距达到 35.6m,设备作业空间更为充足,更有利于施工流水组织。方案五井数较少,对其他工序影响更小,便于多工序平行推进,施工难度相对较低。

4.4 综合比选

在降水效果、沉降控制、经济性、环境影响、施工可行性等多维度分析基础上,构建综合评价指标体系,采用权重评分法进行方案排序。各方案均能满足基坑降水要求,因此“降水效果”作为基本约束条件,各方案赋相同分值。评价指标权重及评分结果如表 5 所示。

综合评价结果表明,方案五加权总分最高(9.00 分),可作为本工程优选降水方案。该方案在保证降水效果和环境控制满足要求的前提下,更好地兼顾了工程投资、施工效率与现场实施条件。

表 4 各降水方案经济性对比

方案	降水井数量 (口)	过滤器半径 (m)	单井施工成本 (万元)	总施工成本 (万元)	水泵总功率(kW)	预估工期(天)	综合造价指数
一	43	0.2	4.5	193.5	215	18	1.00
二	35	0.25	5.0	175.0	175	17	0.92
三	29	0.3	5.8	168.2	145	16	0.88
四	25	0.35	6.5	162.5	125	15	0.85
五	22	0.4	7.2	158.4	110	14	0.82

表 5 各方案综合评价表

评价指标	权重	方案一	方案二	方案三	方案四	方案五
降水效果	0.15	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0
沉降控制	0.2	9.5	9.2	9.0	8.8	8.5
经济性	0.3	7.0	8.0	8.5	9.0	9.5
环境影响	0.1	9.2	9.0	8.8	8.5	8.0
施工可行性	0.25	8.0	8.5	9.0	8.8	9.2
加权总分	—	8.27	8.62	8.83	8.86	9.00

5 结论

本文以南昌地铁某车站深基坑工程为研究对象,围绕富水区基坑降水问题,系统开展了降水方案设计、数值模拟及多指标比选分析。通过理论计算与数值分析相结合的方法,对不同降水参数条件下的降水效果及地层响应规律进行了深入研究,主要结论如下:

(1)在降水参数设计方面,结合工程水文地质条件,确定本工程主要含水层为砾砂层,渗透性强且地下水补给充足,适宜采用坑内降水方式,并选取潜水完整井作为降水井型。通过对降水井深度、基坑总涌水量及单井出水能力的计算,明确了影响降水效果的关键控制参数,为后续方案设计奠定了基础。

(2)在数值模拟分析方面,基于建立 FLAC3D 考虑渗流-应力耦合作用的三维数值模型,对不同降水方案进行了模拟计算。结果表明,各方案均能够在规定时间内实现基坑内地下水位降至设计要求,验证了所设计方案的可行性。

(3)在方案比选方面,从孔隙水压力变化、地表沉降响应、经济性、环境影响及施工可行性等多个维度对五

种方案进行了系统评价。分析结果表明,各方案在降水效果方面差异较小,但在沉降控制与经济性之间存在明显权衡关系:井数较多的方案沉降控制效果较优,但施工成本较高;井数较少的方案经济性更优,但沉降略有增加。在满足规范要求的前提下,综合考虑各项指标,优选出更具工程适用性的降水方案。

[参考文献]

- [1]罗荣,张世涛,田宜敏.复杂地质条件下基坑降水方案设计研究[J].建筑技术,2024,55(16):1956-1958.
 - [2]蔡惠华.邻江软土地层深基坑降水方案设计与应用[J].港口航道与近海工程,2025,62(2):116-120.
 - [3]张国龙,范越,张伟,等.引江济淮凤凰颈泵站基坑降水方案优化[J].长江科学院院报,2022,39(3):111-117.
 - [4]陈松,王巧文,刘春峰.深基坑降水方案优化研究与数值模拟[J].公路,2021,66(12):304-308.
 - [5]何蕃民,彭涛,邓安,等.临河富水砂卵石层深基坑降水方案分析[J].科学技术与工程,2020,20(32):13386-13393.
- 作者简介:孙腾云(1987—),浙江金华人,就职于南昌轨道交通集团有限公司,工程管理专业毕业,工程师。