

# Technical and Economic Analysis of the Waterproof Curtain for the Post Rotary Jet Grouting of Deep Foundation Pit Pile-Anchor Support

Jianxiong Li<sup>1</sup>, Fei Meng<sup>1</sup>, Zhenfang Lu<sup>1</sup>, Dan Gao<sup>1</sup>, Lei Ma<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Civil Engineering Institute, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot Inner Mongolia

<sup>2</sup>Inner Mongolia Ludian Mengyuan Electric Power Engineering Co., Ltd., Hohhot Inner Mongolia

Email: ljxnmg@126.com

Received: Apr. 24<sup>th</sup>, 2019; accepted: May 9<sup>th</sup>, 2019; published: May 16<sup>th</sup>, 2019

---

## Abstract

Through the analysis of a supporting project of deep foundation pit, the paper studies the combination of traditional pile-anchor and soil nail wall support and post rotary jet grouting pile technology, and realizes the design of construction-supporting scheme with non-dewatering. Besides, the safety performance of the supporting system is verified by the mechanical behavior analysis of Midas/GTS. The technical and economic comparison analysis of the supporting scheme of deep foundation with non-dewatering and the original supporting scheme with dewatering are carried out.

## Keywords

Deep Foundation Pit, Waterproof Curtain, Dewatering, Supports

---

# 深基坑桩锚支护后旋喷综合止水帷幕技术经济分析研究

李建雄<sup>1</sup>, 孟斐<sup>1</sup>, 卢振方<sup>1</sup>, 高丹<sup>1</sup>, 马磊<sup>2</sup>

<sup>1</sup>内蒙古工业大学土木工程学院, 内蒙古 呼和浩特

<sup>2</sup>内蒙古鲁电蒙源电力工程有限公司, 内蒙古 呼和浩特

Email: ljxnmg@126.com

收稿日期: 2019年4月24日; 录用日期: 2019年5月9日; 发布日期: 2019年5月16日

## 摘要

通过对某深基坑支护工程的分析, 探讨研究传统桩锚及土钉墙支护与后旋喷桩技术有机结合, 实现不降水施工支护方案的设计, 同时通过Midas/GTS的受力性能分析验证了该综合支护体系的安全稳定性, 并且将深基坑不降水支护方案与原降水支护方案进行技术经济对比分析。

## 关键词

深基坑, 止水帷幕, 降水, 支护

Copyright © 2019 by authors and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

## 1. 引言

近几年, 我国城市建设规模之大, 速度之快, 已位居世界之首, 深基坑支护技术的研究与工程应用也在随之飞速发展。目前, 我国南方大部分临海靠江地区, 因地下水位较高(降排水量大), 工程技术人员普遍研究和采用桩墙或钢筋混凝土地下连续墙做基坑的挡土墙和止水帷幕(俗称两墙合一); 而在北方, 因地下水位普遍较低(干旱少雨, 地下水匮乏), 基坑施工降水多采用明排法、管井法等抽取地下水排入市政管网。超采地下水会形成大范围降水漏斗, 不仅会导致地基沉降和建筑物的破坏[1] [2], 而且也会造成严重的地下水资源浪费。针对基坑排水问题研究表明减采地下水仍是主要预防措施, 为确保基坑工程顺利施工, 压力回灌[3]是有效措施(事实上回灌极其困难)。当今, 我国在禁止降水施工区域常采用地下连续墙、混凝土搅拌桩墙止水帷幕等措施[4], 但基坑工程建造成本很高。本文就桩锚支护后旋喷综合止水帷幕技术进行研究分析, 以期实现不降水支护施工, 努力降低建造成本, 节约水资源。

## 2. 工程概况

某商务综合楼总建筑面积约 10 万平方米, 南北长 140 m, 东西宽 120 m, 地下两层, 基坑开挖深度为 12 m。结构类型为框架剪力墙结构。勘察期稳定水位 $-8.00\text{ m}\sim-8.50\text{ m}$ , 属于潜水, 含水层为砾砂层和细砂层。基坑及周边建筑分布如图 1 所示。



Figure 1. Construction site and foundation pit

图 1. 施工场地及基坑

### 3. 基坑原降水设计方案

利用井点降水使基坑中心水位降至-12.5 m。基坑采用护坡桩与土钉墙综合支护方案：图 1 中 V、VI 区采用桩锚联合支护，其他分区采用土钉墙按照 1:0.3 放坡支护施工，I、II 和 VII 区超载区域通过增加 1~2 排预应力锚索控制。

土钉墙技术参数。土钉及锚索倾角 10 度，水平、竖向间距均为 1.5 m，土钉及锚索长度分别为 9 m、15 m，钻孔直径分别为 100 mm、130 mm，孔深均超挖 0.5 m，详见表 1。

Table 1. Support mode partition table

表 1. 支护方式分区表

分区位置	I、II 区	III 区	IV 区	VII 区
土钉及锚索	共七排	共六排	共六排	共七排
预应力锚索位置	第三排	第一、三排	第三排	第二、四排

护坡桩技术参数。V 区、VI 区护坡桩长分别为 15.0 m、17.0 m，直径均为 600 mm，桩中心距 1.20 m，均设置三道预应力锚索，锚索总长 15 m，自由段 5 m，锚固段 10 m，护坡桩顶设有冠梁。

### 4. 基坑不降水止水帷幕支护设计方案

#### 4.1. 基坑支护方式

考虑到枯水期水位变化，止水帷幕设计须高出稳定水位 2 m~3 m。整个基坑先按 1:0.3 放坡挖至自然地面以下 5 m，塔吊周边进行局部放坡处理。-5 m 以下采用护坡桩支护，桩顶标高-5 m；I、II、VI、VII 区设计深度 12 m，桩长 12 m，笼长 12 m；III、IV、V 区设计深度 10.5 m，桩长 12 m，笼长 9 m，桩下部 3 m 仅作隔断基坑内外水位联系的作用。桩含钢筋笼部分埋入土中深度 4.5 m，满足规范围护桩插入比不小于 1/3 的要求，支护简图如图 2 (单位 m)。

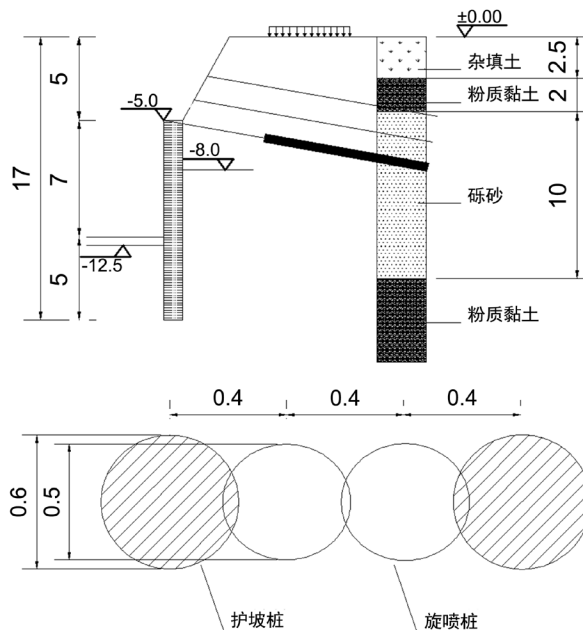


Figure 2. Simple drawing of the waterproof curtain  
图 2. 止水帷幕支护简图

## 4.2. 止水帷幕

先施工钢筋混凝土护坡桩，然后再在期间补施两根旋喷桩与护坡桩严密咬合形成止水帷幕。旋喷桩直径 500 mm，长度为 12.0 m，两旋喷桩中心距为 400 mm，旋喷桩间搭接 100 mm，旋喷桩与护坡桩中心距为 400 mm，搭接长度为 150 mm。

## 4.3. 基坑支护设计参数

基坑所有分区桩的桩径均为 600 mm，笼径 500 mm，桩中心距 1.2 m，桩顶设有 600 × 400 冠梁一道，冠梁内设有一道 15 m 长，水平间距 1.2 m 的预应力锚索。设置在冠梁内的锚索，自由段 5 m，锚固段 10 m，注浆达到设计强度后再施加 153 KN 预应力。锚索及土钉技术参数见表 2。

Table 2. Anchor cable (soil nail) parameters

表 2. 锚索(土钉)参数

	长度	水平间距	竖向间距	钻孔直径
第一排土钉	8 m	1.5 m	2 m	100 mm
第二排土钉	10 m	1.5 m	1.5 m	100 mm
第三排预应力锚索	15 m	1.2 m	1.5 m	150 mm

## 4.4. 组合支护体系稳定性分析

内部整体稳定性分析。由土钉、锚索、止水帷幕及护坡桩对整体稳定的单独贡献可得边坡稳定系数  $K_s = 1.37 < 1.4$ ，不满足侧壁安全等级一级的要求。经分析计算，将放坡处的第一排土钉换为锚索可增大内部稳定性。调整后锚索技术参数见表 3， $K_s = 1.42 > 1.4$ ，满足设计要求。

Table 3. Anchor cable parameters

表 3. 锚索参数

	长度	水平间距	竖向间距	钻孔直径
第一排预应力锚索	15 m	1.2 m	1.5 m	130 mm
第二排土钉	10 m	1.5 m	1.5 m	100 mm
第三排预应力锚索	15 m	1.2 m	1.5 m	150 mm

其他稳定性验算。方案调整后抗滑移安全系数  $K_H = 1.36 > 1.2$ ，抗倾覆稳定安全系数  $K_q = 1.28 > 1.2$ ，抗隆起稳定性系数  $2.3 > 1.8$ 、渗流稳定性验算均满足要求。篇幅所限，不做详述。

取桩底以下 15m 区域绘制流网图，分析计算得地下水的涌水量  $Q = 2.52\text{m}^3/\text{d}$ ，即整个基坑每日渗流量约  $2.52\text{m}^3$ ，施工时仅做适当排干即可，帷幕止水效果良好。

## 5. 止水帷幕支护方案有限元受力性能分析

利用 MIDAS 软件对不降水支护方案主要受力结构进行施工全过程模拟分析[5]。

本工程设计每次挖深 1.5 m，按取土顺序可划分为六个阶段，共计 13 种工况。

桩身、桩顶水平位移随取土深度增加不断增大，但桩顶最大水平位移仅 8 mm，源于桩顶设有一道锚索限制其水平位移发展。锚索及被动区土压力形成两个支点，使桩身中部位移较大，故第六阶段取土后桩中部出现最大位移 20 mm，见图 3。桩的水平位移符合一类基坑水平位移不大于 30 mm 的要求。

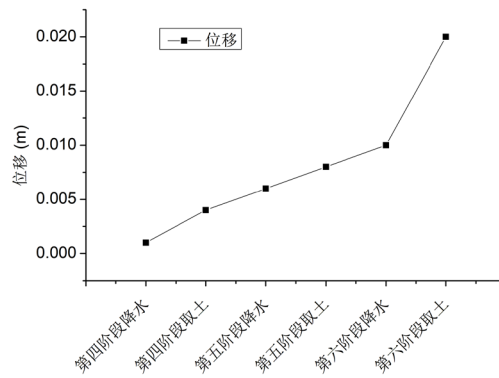


Figure 3. Pile horizontal displacement map  
图 3. 桩身水平位移图

从桩身弯矩及剪力图(图 4)中可以看出最大剪力为 183 kN，弯矩随取土深度增加而增加且增速加大，最大值为 261 kN·m，桩在坑内主动区产生较大负弯矩，被动区产生正弯矩，又因坑内外水压力的存在使桩身出现两个正负弯矩转折点。

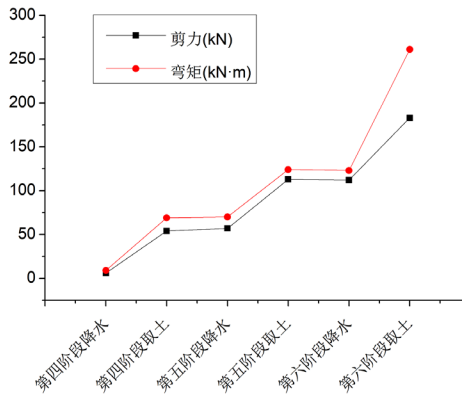


Figure 4. Pile bending moment and shear force diagram  
图 4. 桩身弯矩及剪力图

锚索设在-2 m、-5 m 处。由图 5 可知第一道锚索最大轴力 114 kN，第二道锚索最大轴力 277 kN。第一道锚索由于不承受桩尖作用力直接与土钉墙共同作用，受力较小；第二道锚索控制桩尖及桩后滑移区域水平位移，承受桩尖力，故轴力较大。

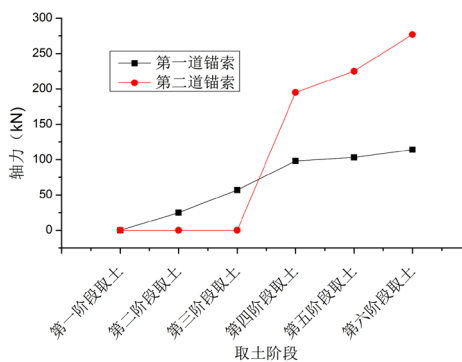


Figure 5. Anchor axial force  
图 5. 锚索轴力

如图所示，起始时坑内土的应力释放导致基坑底板隆起范围较广且均匀，中后期支护结构的位移变化及被动土压力受力增大，最大隆起处随土层开挖逐渐向基坑坑脚移动。基坑竖向位移见图 6、基坑底部隆起值见图 7。

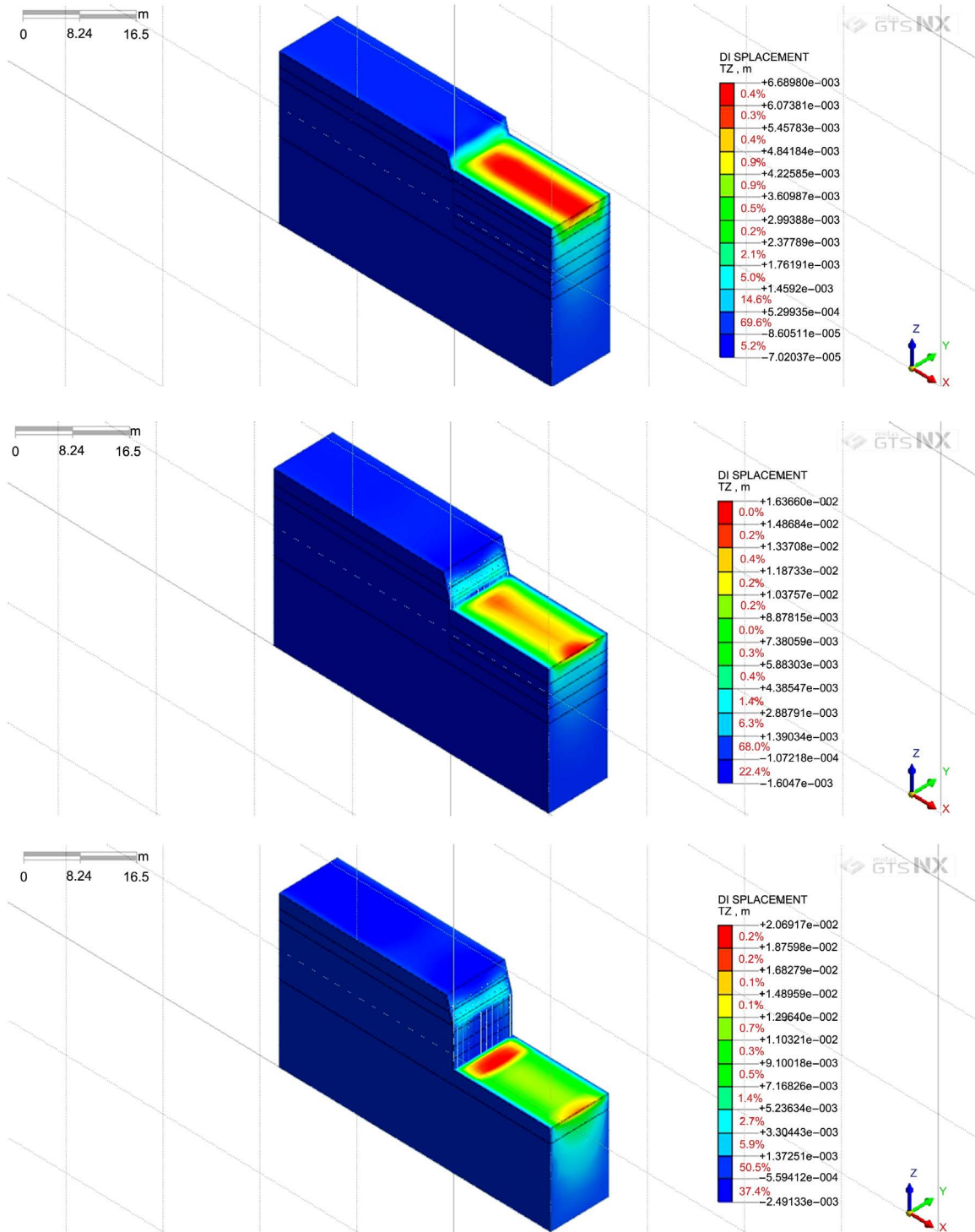


Figure 6. Vertical displacement of foundation pit  
图 6. 取土基坑竖向位移

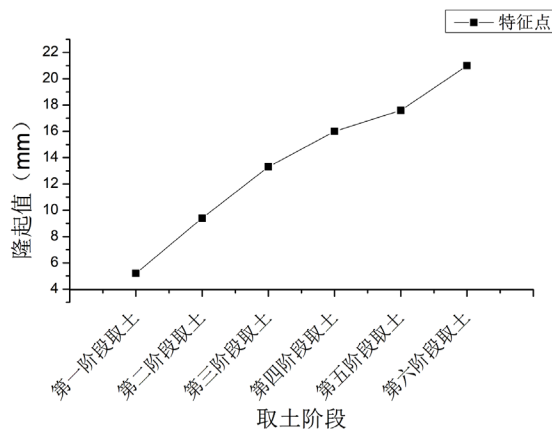


Figure 7. Foundation pit floor heave  
图 7. 基坑底板隆起

不降水设计方案基坑周边最大沉降出现在距其一倍开挖深度处，沉降值仅为 2.5 mm；原降水支护设计方案最大沉降量计算见表 4；不降水设计方案沉降量较小，对基坑周围环境影响较小，如图 8。

Table 4. Maximum settlement of precipitation support  
表 4. 降水支护最大沉降量

	三角形法	指数法	抛物线法
最大沉降量	8 mm	12 mm	5 mm

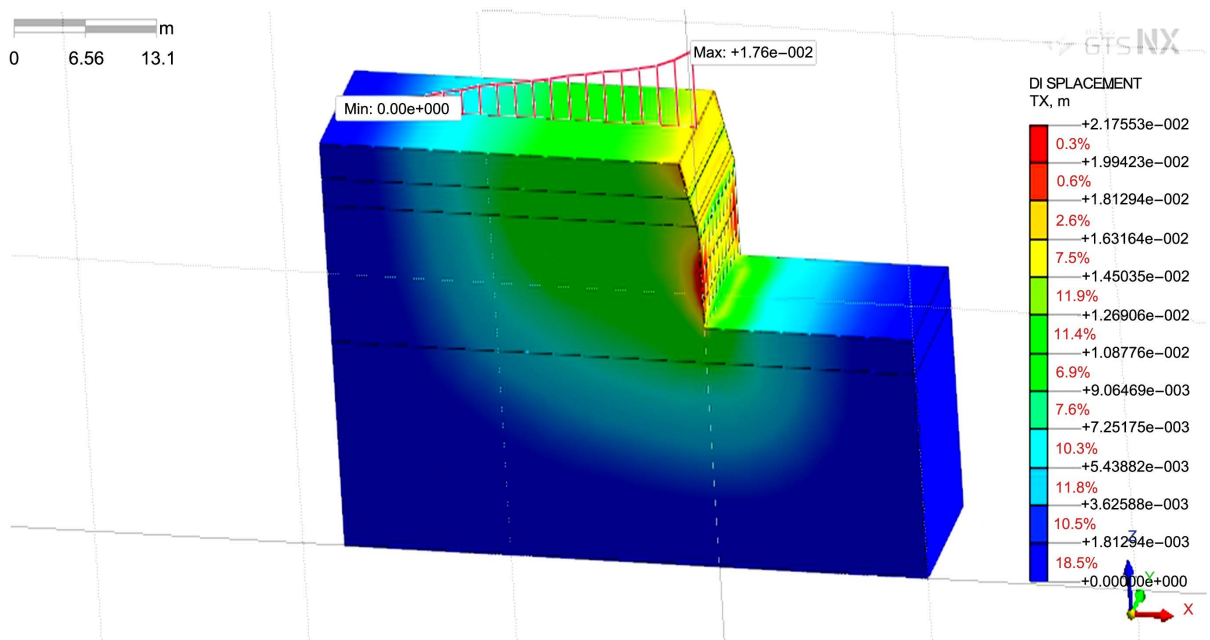


Figure 8. Foundation pit influence range  
图 8. 基坑影响范围

基坑开挖过程由于被动土压力作用，剪力最大值均出现在基坑坑脚处，因此施工过程中要注意保护基坑坑脚位置，防止由于扰动、超挖等破坏基坑坑脚导致坑脚剪切破坏。

通过 MIDAS 分析得知，由于桩身只设一道锚索以及基坑外的水压力作用，导致位于桩顶的第二道

预应力锚索在开挖最后一层土后,最大轴向拉力为 277 kN,超出设计值 218 kN,应对不降水支护设计方案进行调整,以满足设计要求。经验证,可行调整方案为:方案 A,将第二道锚索水平间距由 1.2 m 缩至 0.8 m;方案 B,第二道冠梁内锚索由 2 根  $\Phi 15.24-1860$  钢绞线增为 3 根,以增大锚索的轴向承载力。

方案 A 须增加锚索 155 根,总长 2313 m,每米综合单价为 116 元,共需增加 26.83 万元;方案 B 需增加钢绞线及其制作安装等费用,增加长度 15m 的  $\Phi 15.24-1860$  钢绞线共 309 根,每根综合单价 112 元,共需增加 3.46 万元。方案 B 经济可行且满足设计要求。且该不降水支护方案相比采用排桩或地下连续墙而言,混凝土用量较少,施工机具简便,工期较短,属优选方案。

## 6. 技术经济对比分析

经济性对比。采用综合单价计算,原降水支护方案(即方案一)费用合计 279.84 万元,其中工程量包含土钉 5042.8 m,桩 2257 m,锚索 8869.5 m;止水帷幕支护设计方案(即方案二)费用合计 303.37 万元,与前方案相比,工程量主要变动在土钉减少为 2470 m 且增加旋喷桩共计 7416 m。因此,后方案比前方案费用增加 8.41%。

工期对比。方案一基坑四周均设有 1~2 道预应力锚索,每步挖土至少须在锚索注浆养护 21 天施加预应力后进行,放坡开挖区设有多层土钉,护坡桩支护区设有三道锚索。而方案二中相邻旋喷桩在护坡桩桩身强度达到设计强度的 75%后即可施工,且仅设有两道锚索一道土钉,较方案一约缩短工期 1 个月。

节水对比。方案一以 24 眼抽水管井设置,经计算全天抽水量约 12,230.4 m<sup>3</sup> 计算,基坑施工需持续抽水 1.5 年,抽水总量为 6531 万吨;方案二中帷幕插入不透水层,渗流量甚微,仅需基坑疏干,总抽水量极少,可节约水资源约 6531 万吨。

## 7. 结语

深基坑桩锚支护后旋喷综合止水帷幕支护方案节能环保,且经有限元模拟分析验证了该方案支护结构受力、变形合理,基坑整体稳定。与传统支护方案相比,该方案可大量节约地下水资源,有效避免地面沉降带来的危害,且旋喷桩与护坡桩在接近地下水位处共同组成止水帷幕,不仅大量减少了地下水的排放,也有效地控制了工程的建造成本。不降水综合支护方案科学、安全,适用性强,此技术对类似深基坑工程不降水施工具有很好的推广应用价值。

## 参考文献

- [1] 宋清,杨旭东.超采地下水对地面沉降的影响[J].水文地质工程地质技术方法动态,2009(2):47-50.
- [2] 李兵岩.天津市汉沽地区地面沉降数值模拟[D]:[硕士学位论文].北京:防灾减灾学院,2016.
- [3] 王会刚.浅层地下水压力回灌现场试验研究[D]:[硕士学位论文].济南:山东建筑大学,2016.
- [4] 马磊.地下水对深基坑支护工程设计方案的影响分析研究[D]:[硕士学位论文].呼和浩特:内蒙古工业大学,2018.
- [5] 李志.Midas/GTS在岩土工程中的应用[M].北京:中国建筑工业出版社,2012.



**知网检索的两种方式：**

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2326-3458，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：[hjce@hanspub.org](mailto:hjce@hanspub.org)