

文章编号: 1007-2993(2023)03-0373-06

# 兰州地区土岩组合地层深基坑支护 及地下水控制方法

郭志元<sup>1</sup> 龙照<sup>1,2</sup> 曹程明<sup>1</sup> 何腊平<sup>1</sup>

(1. 甘肃中建市政工程勘察设计院有限公司, 甘肃兰州 730000; 2. 中国市政工程西北设计研究院有限公司, 甘肃兰州, 730000)

**【摘要】** 兰州地区为典型的两山夹一川的河谷盆地地貌, 区内浅部为第四系松散堆积物, 下部为新近系风化基岩。介绍了兰州地区土岩组合地层的基本分布情况及地下水分布规律, 并根据下部风化基岩的胶结程度、透水性、单轴饱和抗压强度等特征, 将土岩组合地层分为两类, 一类系上部为松散堆积地层、下部为弱透水—中等透水性砂岩, 二类系上部为松散堆积地层、下部为不透水性砂岩。针对两类不同的土岩组合地层, 归纳总结了深基坑工程支护结构及地下水控制系统的选型, 给出了两类土岩组合地层中深基坑设计的典型案例, 可为同类地层深基坑工程设计与施工提供借鉴。

**【关键词】** 土岩组合地层; 深基坑; 支护结构; 地下水控制

**【中图分类号】** P 642; TU 473

**【文献标识码】** A

doi: 10.3969/j.issn.1007-2993.2023.03.020

## Deep Foundation Pit Support and Groundwater Control Method in Soil Rock Combination Strata in Lanzhou Area

Guo Zhiyuan<sup>1</sup> Long Zhao<sup>1,2</sup> Cao Chengming<sup>1</sup> He Laping<sup>1</sup>

(1. GanSu CSCEC Municipal Engineering Investigation and Design Institute Co., Ltd., Lanzhou 730000, Gansu, China; 2. CSCEC AECOM Consultants Co., Ltd., Lanzhou 730000, Gansu, China)

**【Abstract】** Lanzhou area is a typical valley basin landform with two mountains and one river, the upper part of the area is Quaternary loose deposits and the lower part is Neogene weathered bedrock. The basic distribution of soil-rock combination strata and the distribution of groundwater in Lanzhou area was introduced. According to the cementation degree, water permeability, and uniaxial saturated compressive strength characteristics of the lower weathered bedrock, the soil-rock combination strata was divided into two types. The upper part of one combination is a loose accumulation layer, and the lower part is a weakly permeable to moderately permeable sandstone. The upper part of the other combination is a loose accumulation layer, and the lower part is an impermeable sandstone. For two types of soil-rock combination strata with completely different properties, the selection of supporting structure and groundwater control system for deep foundation pit engineering was summarized, and a typical case of deep foundation pit design in two types of soil-rock combination strata was given which provides a good reference for the design and construction of deep foundation pit engineering in similar strata.

**【Key words】** soil-rock combination strata; deep foundation pit; supporting structure; groundwater control

### 0 引言

地下空间的开发利用是解决城市用地紧张局面的一个发展趋势, 近年来地下商场、地下停车场、地下污水处理厂、地铁、综合管廊等地下建(构)筑物不断涌现。地下建(构)筑物大规模开发, 基坑越来越深。基坑周边多为已建成的建(构)筑物, 地下管线较多,

周边环境复杂, 多个城市基坑开挖范围内的地层结构由单一的第四系人工填土及松散沉积物地层向土岩组合地层发展。

朱志华等<sup>[1]</sup>以青岛地区两个深基坑工程为例, 研究了上部土层、下部花岗岩地层的基坑支护方式, 探讨了桩锚、喷锚、内支撑相结合的支持体系在青岛地

基金项目: 甘肃省科技计划(20JR10RA570)

作者简介: 郭志元, 男, 1988年生, 汉族, 甘肃古浪人, 硕士, 高级工程师, 主要从事岩土工程勘察、设计工作。E-mail: 1970193084@qq.com

区深基坑中的应用,得出三种支护体系在控制基坑水平位移、支护桩内力及周边地表沉降等方面具有明显效果的结论。刘方克等<sup>[2]</sup>对青岛地铁建设中11个深基坑工程中大量监测数据进行分析,研究了上部土层、下部花岗岩地层中基坑的变形规律。张传军等<sup>[3]</sup>总结了岩石地区基坑工程典型支护方式,并介绍了青岛地区吊脚桩+锚索支护体系在土岩组合地层中的应用,得出围护结构变形主要集中在土层部分,采用吊脚桩+锚索支护体系可有效控制基坑支护结构及周围环境变形的结论,这一结论在刘红军等<sup>[4]</sup>、吴燕开等<sup>[5]</sup>的研究中也得到了验证。庄岳欢等<sup>[6]</sup>研究了佛山地区土岩二元结构地层中上部土层采用“微型桩+搅拌桩+土钉+预应力锚索”的复合土钉墙支护,下部岩层采用放坡喷锚的基坑设计方案及支护结构变形。龙照等<sup>[7]</sup>研究了兰州地区强透水卵石与弱透水风化砂岩组合地层中的基坑支护与降水设计案例。青岛地区土岩组合地层的基坑研究成果较多,兰州地区基岩性质与青岛地区有显著差异,但兰州地区不同岩性特征的土岩组合二元地基深基坑支护结构及地下水控制选型的研究较少。本文对兰州地区土层二元地层按下部基岩工程性质进行了分类,归纳总结了不同分类二元组合地层中深基坑支护与地下水控制的方法。

## 1 兰州地区工程地质特征

### 1.1 地层分布特征

兰州地区地处陇西黄土高原的西部边缘与青藏高原交接地带,区内地势南北高,中间低,为典型的“两山夹一川”河谷盆地地貌。工程建设较为频繁的区域主要为黄河两岸河漫滩及Ⅰ级、Ⅱ级阶地的主城区,区内浅部为厚度1~5m的第四系人工堆积物;其下为第四系冲洪积粉土、粉质黏土层,厚度2~20m,其中西固地区分布有厚度较大的粉质黏土,最大厚度可达20m以上,其余地区多为黄土状粉土或粉土与粉质黏土夹层,厚度一般小于10m;冲洪积细颗粒堆积层下部一般为第四系冲积卵石层,分布厚度变化较大,其中崔家大滩—小西湖一带的七里河断陷盆地分布厚度较大,一般大于200~300m,其余地带卵石层厚度约3~10m。第四系松散堆积层下部为新近系陆相湖盆沉积的砂岩或砾岩,为区域基岩底座,分布厚度大于100m,除七里河断陷盆地外,主城区其余地段基岩埋深较浅,顶板起伏不大,总体来看,兰州市区内新近系砂岩在漫滩、一级阶地及二级阶地前缘埋深约5~10m,这些区域也是工程建设最为频繁的地段,在二级阶地中部基岩埋深10~20m,二级

阶地后缘可达25~30m以上。

### 1.2 地下水分布特征

兰州市主城区内地下水类型主要为第四系松散层内孔隙潜水和新近系强风化砂岩孔隙、裂隙潜水。七里河断陷盆地内,所揭露的地下水为第四系松散层孔隙潜水,地下水主要赋存于第四系全新统冲洪积砂卵石土以及下更新统冲积卵石土层中,水位埋深1~5m,含水层主要位于上部无胶结的粗颗粒地层中。主城区其余地段地下水类型为黄河阶地松散层内孔隙潜水,地下水主要赋存于第四系全新统冲洪积卵石土层,水位埋深1~5m,厚度可达4~15m,渗透系数约40~50m/d,卵石下部的砂岩为中等—弱透水层或不透水层,局部强风化砂岩层风化严重,导致上部强风化砂岩中存在少量地下水,该类地下水属于新近系强风化岩孔隙、裂隙潜水,与上部卵石层内地下水相互连通。区内地下水主要补给来源为大气降水、侧向径流补给,地下水多排入黄河地表水,水位变化幅度约1.0~1.5m。

### 1.3 下伏基岩特征及分类

因构造及沉积环境不同,兰州主城区内基岩工程性质差别较大,一类为胶结程度较差、强度较低、弱—中等透水性的砂岩,其单轴饱和抗压强度一般小于1.0MPa,渗透系数一般为 $1 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10^{-2}$  cm/s,粉粒含量较多,粒径大于0.075mm的颗粒含量百分比达60%~90%,多为粉砂岩或细砂岩,基坑开挖后,短时间内砂岩急剧风化,在基坑内外较大的水头差下,砂岩易发生管涌破坏,风化砂岩中的粉细砂颗粒在渗透作用下逐渐流入坑内,边坡下部被掏空,甚至引起基坑侧壁坍塌(见图1),火车站、南关十字、天水路十字、西关十字一带砂岩多具这种性质。



图1 透水性砂岩中的渗透破坏

另一类为胶结程度相对较好、强度相对较高、不透水的砂岩,该类砂岩多为钙质或泥质胶结的泥质砂岩或砂质泥岩,单轴饱和抗压强度一般大于1.0MPa,渗透系数多小于 $1 \times 10^{-5}$  cm/s,基坑开挖后除在裂隙

内经长时间渗透作用会产生地下水,一般认为在不扰动坑底基岩结构的情况下,该类基岩为不具透水性,坑内地下水多沿土岩结合面流出(见图2),如盐场堡、雁北路一带等黄河河漫滩处下覆基岩多具这种性质。



图2 不透水砂岩地下水沿土岩结合面流出

本文将上部为松散堆积地层、下部为弱—中等透水性砂岩地层定义为一类土岩组合地层,将上部为松散堆积地层、下部为不透水性砂岩地层定义为二类土岩组合地层。

## 2 常见基坑支护结构与地下水控制措施

兰州地区较为常用的基坑支护方式有土钉墙、预应力锚杆复合土钉墙、排桩、预应力锚索排桩、内支撑排桩及以上多种方式的组合。其中土钉墙适用于地下水位以上或经降水的基坑,且基坑深度不宜大于12 m;预应力锚杆复合土钉墙适用于地下水位以上或经降水的基坑,且基坑深度不宜大于15 m;排桩适用于深度较浅、基坑周边无放坡条件、周边建(构)筑物及管线对变形控制要求不严格的基坑工程,悬臂支护深度一般不大于6 m;预应力锚索排桩及内支撑排桩多用于深度较大、变形控制要求较严的基坑工程。兰州地区常用的地下水控制措施主要有管井降水和咬合桩止水帷幕。对于开挖深度较小的基坑多未揭露到下伏基岩或揭露厚度不大,以下主要针对开挖深度大于15 m的两类土岩组合地层中分析基坑支护结构与地下水控制措施的选型。

### 2.1 一类土岩组合地层中基坑支护结构与地下水控制措施

一类土岩组合地层上部为松散堆积层、下部为弱—中等透水性砂岩,该类土岩组合地层下部砂岩风化程度较高,基坑开挖后,在卸荷扰动及大气暴露环境下,坑底砂岩基本呈“密实砂”状,使用铁锹即可开挖,因其单轴饱和抗压强度较低,导致锚索极限粘结强度标准值也相对较低,一般仅有60~80 kPa,若采用常规直径锚索,锚索抗拔承载力较小,难以满足设计要求。另外,一类土岩组合地层下部砂岩具有

弱—中等透水性,降水影响半径较小,采用管井降水时,砂岩层内地下水存在“一抽即干,一停即满”现象。因此合理选择基坑支护结构形式及地下水控制措施是一类土岩组合地层深基坑工程设计的关键。

对于一类土岩组合地层,兰州地区常见基坑支护结构为预应力锚索+排桩,排桩直径一般800~1200 mm,支护桩间距一般取1.8~2.5倍桩径,嵌固深度一般为0.3~0.6倍基坑深度。针对一类土岩组合地层下伏砂岩锚索极限粘结强度标准值较低的情况,当采用普通锚索无法满足设计要求时,可考虑在风化砂岩层中采用高压旋喷锚索工艺,经工程实践证明,兰州地区一类土岩组合地层下伏砂岩中高压旋喷锚索直径可达400 mm以上<sup>[7]</sup>,通过采用大直径锚固体的锚索可有效解决因极限粘结强度标准值过低造成锚索抗拔承载力较小的弊端。此外,当基坑周边荷载较大、对变形控制要求较为严格,排桩+预应力锚索不足以满足稳定性要求时,也可考虑采用内支撑+排桩及预应力锚索+双排桩的支护结构。总体来说,大部分工程项目采用预应力锚索+排桩做为支护结构即可满足设计要求。

地下水控制方面,结合深基坑排桩支护结构设置咬合桩进行止水,坑外设置减压井在一定程度上降低地下水以免坑底透水砂岩发生管涌破坏,针对一类土岩组合地层下伏砂岩具弱—中等透水性,在基坑内设置多级简易轻型井点,必要时坑壁设置轻型横向井点结合坑内排水盲沟及集水井对坑内地下水进行疏排。

### 2.2 二类土岩组合地层中基坑支护结构与地下水控制措施

二类土岩组合地层中下伏基岩一般不具透水性,工程性质较好,一般采用挖掘机即可开挖,局部地段需采用爆破法开挖。对于二类土岩组合地层,选用经济合理的支护结构是基坑工程需要关注的重点问题。

基坑支护结构选型方面,当周边环境条件简单,基坑周边建(构)筑物对变形要求较低时,可采用土钉墙、预应力锚索复合土钉墙进行支护,上部松散堆积层放坡坡率根据地层情况一般可取1:0.5~1:1.2,下部基岩放坡坡率可取1:0.2~1:0.4,土岩结合面处可设置1.0~2.0 m宽平台,以减小基岩上部松散堆积层底部的应力集中。当基坑周边环境条件复杂,基坑周边建(构)筑物对变形要求较严时,可采用预应力锚索+排桩的支护结构,排桩直径一般800~1200 mm,支护桩间距一般取2.0~2.5倍桩径,嵌固深度一般为0.3~0.5倍基坑深度。该类土岩组合地层中,

基岩层锚索极限粘结强度标准值可达 100~120 kPa, 当采用预应力锚索+排桩支护方案时, 一般采用常规锚索即可满足设计要求。

基坑地下水控制设计方面, 该类土岩组合地层中地下水主要富存于卵石层中, 下覆基岩不透水, 偶见裂隙水, 坑外采用管井降水, 降水井间距一般取 15~20 m 即可满足降水要求, 降水引起的地面沉降较小, 可忽略不计, 故一般不需设置止水系统。另外, 二类土岩组合地层中开挖基坑后, 卵石层地下水往往易沿土岩组合面渗出, 结合基坑支护结构选型, 当采用土钉墙方案进行支护时, 可在土岩结合层面处平台上设置排水沟, 收集并排出渗出的地下水; 当采用预应力锚索+排桩支护方案时, 可在土岩结合层面处设置横向泄水孔, 排出坑外残留的地下水。

### 3 工程案例

#### 3.1 一类土岩组合地层中的基坑工程案例

兰州红楼时代广场项目场地位于兰州市城关区, 地貌类型属黄河南岸 II 级阶地, 地势基本平坦, 基坑深度范围内地层主要为第四系松散沉积物和古近系一新近系红层砂岩, 自上而下具体为: 杂填土、粉质黏土、卵石和风化砂岩, 属典型的一类土岩组合二元地层。场地稳定地下水水位埋深 3.7~4.6 m, 属第四系孔隙潜水, 主要含水层为卵石层, 强透水层, 渗透系数约 50 m/d; 下部新近系风化砂岩胶结程度差, 为中等透水层, 渗透系数约为  $1.2 \times 10^{-3}$  cm/s。项目基坑开挖总面积约 9115 m<sup>2</sup>, 周长 400 m, 主楼坑中坑基坑开挖深度 25.3 m, 局部 26.3 m, 裙楼基坑开挖深度 17.4~21.3 m, 为当时兰州地区开挖深度最大的建筑基坑, 基坑平面布局及周边环境见图 3, 典型支护剖面见图 4。

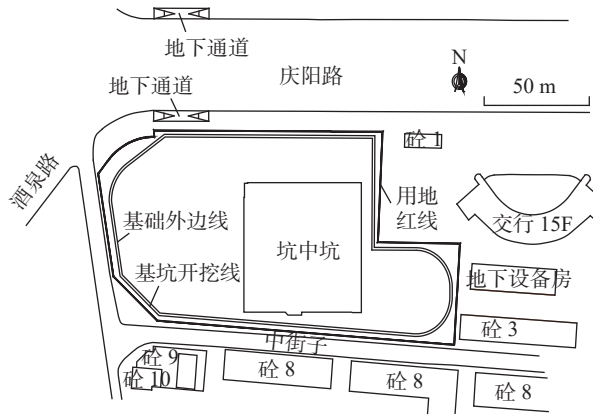


图 3 兰州红楼时代广场基坑周边环境示意图

基坑支护结构采用排桩+预应力锚索, 支护桩直径 1.0 m, 桩间距 1.9 m, 桩身设 4~5 道预应力锚索, 其中, 风化砂岩层中采用高压旋喷锚索, 锚索长度

13~15 m。结合排桩支护结构, 设置咬合桩形成侧壁止水结构, 同时, 坑外设置管井井点、坑内侧壁设置横向轻型井点、坑底风化砂岩层设置竖向轻型井点及集水井与明排截水沟对地下水进行了控制, 坑外管井间距 15~20 m, 井深约 20~25 m, 坑内集水井间距 20 m, 风化砂岩竖向轻型井点间距 1.5 m×1.5 m, 侧壁横向轻型井点间距同支护桩桩间距。

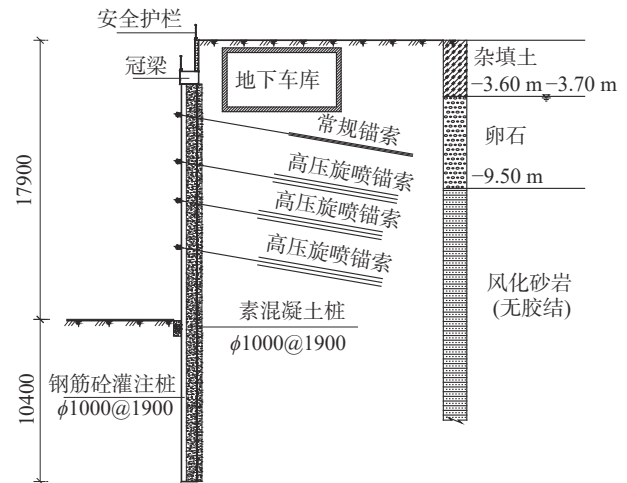


图 4 兰州红楼时代广场基坑周典型剖面示意图(单位:mm)

基坑开挖期间, 实测支护桩水平位移 10.6~33.6 mm, 基坑周边地面沉降 9.8~10.5 mm, 基坑周边建筑物沉降 3.6~21.96 mm, 地下水控制措施基本实现了坑内干作业目标。基坑变形及稳定性满足规范要求, 达到了较好的效果。

#### 3.2 二类土岩组合地层中的基坑案例

名城兰州城市综合体项目工程场地原始地貌为黄河河漫滩, 拟建场地地层自上而下分别为素填土、杂填土、粉细砂、卵石、中砂、强风化泥质砂岩、中等风化泥质砂岩、粗砂岩、砾岩、砂砾岩互层岩段, 上部填土及松散堆积层厚度约 11~16 m, 下部为胶结程度较好的不透水基岩; 场地范围内地下水类型为孔隙型潜水, 主要赋存于卵石层中, 地下水位稳定埋深约 3.6~7.2 m, 场地地下水位稳定埋深略高于邻近黄河河道内的河水位, 水位值相差约 0.4 m, 基坑距离黄河地表水约 80~100 m。基坑开挖面积约 51140 m<sup>2</sup>, 周长 1215.5 m, 基坑开挖深度为 12.0~22.5 m, 基坑平面布局及周边环境见图 5。

基坑南侧、西侧距离用地红线 15~18 m, 基坑深度 11.8~15.8 m, 支护结构采用预应力锚索复合土钉墙进行支护, 上部填土及卵石层坡率 1:0.4, 土钉水平间距及竖向间距 1.5 m, 土钉长度 7.0 m, 基坑边坡上部设置 1~3 道长度 12 m 预应力锚索用以控制基坑变形, 基坑下部风化砂岩开挖段采用土钉墙支护,

放坡坡率 1 : 0.2, 土钉长度 4.0 ~ 5.0 m, 土钉水平间距、竖向间距 1.5 m (见图 6)。基坑北侧、东侧为高速公路, 用地红线紧邻公路路堤, 基坑深度 11.8 ~ 22.5 m, 上部 4 m 采用 1:0.5 坡率放坡, 坡内设

置两道预应力锚索, 锚索长度 7 m, 间距 1.5 m, 下部采用排桩+预应力锚索支护, 支护桩直径 1.0 m, 间距 2.2 ~ 2.6 m, 桩长 23.2 ~ 25.2 m, 桩间设置 2 ~ 3 道预应力普通锚索, 锚索长度 13.0 ~ 16.0 m (见图 7)。

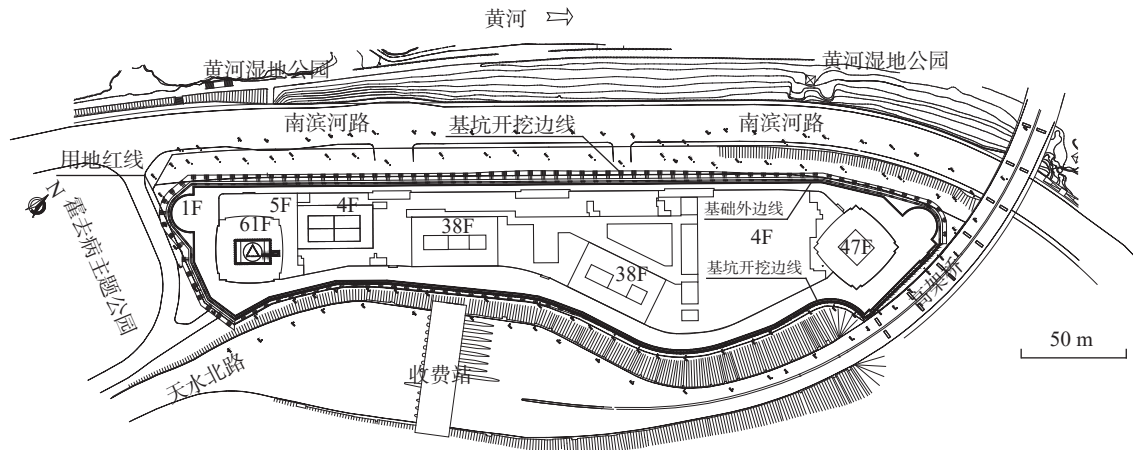


图 5 名城兰州城市综合体项目基坑周边环境示意图

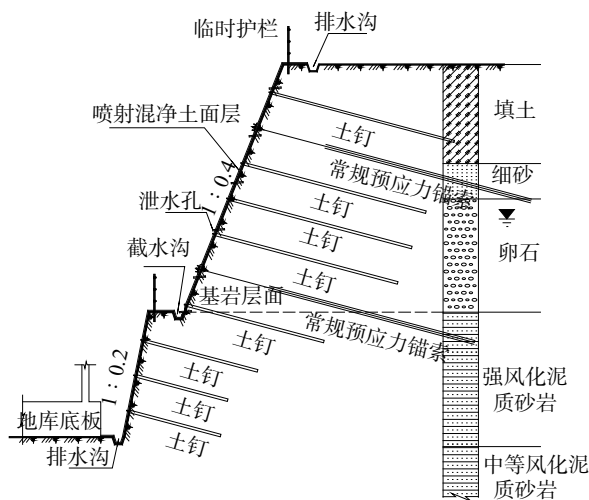


图 6 预应力复合土钉墙剖面示意图

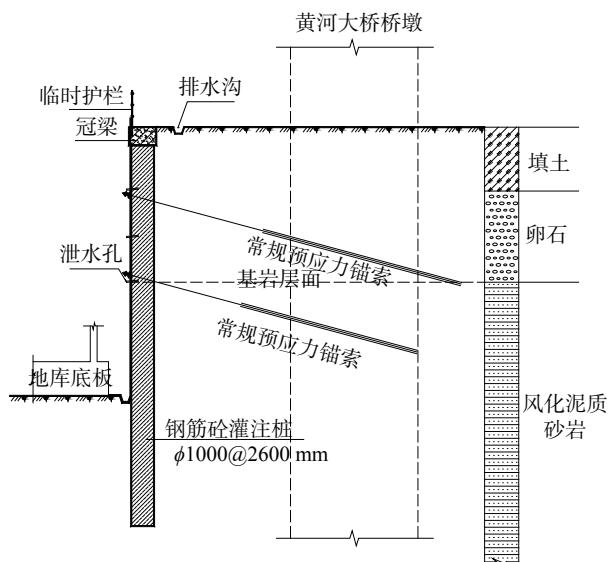


图 7 预应力锚索+排桩剖面示意图

基坑外侧设置管井降水井, 降水井间距 13.0 ~ 16.0 m, 井深 9.6 ~ 19.6 m, 坑内设置集水坑及明排截水沟, 基坑西侧及南侧在土岩结合面处设置宽度 1.5 m 平台, 平台上靠近基坑外侧方向设置截水沟, 用于收集截排土岩结合面未疏干而渗出的地下水; 北侧及东侧在卵石层面与砂岩层顶面处设置泄水孔, 将基坑外侧未疏干的地下水导入坑内排水明沟统一排出, 基坑坑内设置集水坑用于疏干地下水。

基坑开挖期间实测支护结构水平位移 5.86 ~ 23.08 mm, 竖向位移 0 ~ 13.32 mm, 基坑周边地面沉降值 3.44 ~ 6.94 mm, 周边建筑物竖向位移 0.14 ~ 2.41 mm, 均在规范允许范围内。该方案解决了邻近黄河土岩组合地层基坑降水难题, 所采用的支护结构科学、经济、合理, 基坑使用期间未发生任何隐患, 保证了主体结构施工的顺利推进。

#### 4 结论

(1) 根据土岩组合地层下部基岩工程性质的区别, 将兰州地区土岩组合地层归纳为两类: 一类系上部为松散堆积地层、下部为弱透水—中等透水性砂岩; 二类系上部为松散堆积地层、下部为不透水性砂岩。按此分类有利于针对土岩组合地层类别合理选择深基坑支护结构与地下水控制方案。

(2) 对于一类土岩组合地层, 基坑地下水控制除采用咬合桩帷幕结合坑外减压管井外, 还需在基坑底部风化砂岩内采用竖向轻型井点、基坑侧壁采用横向轻型井点降水措施, 以有效解决弱—中等透土层中地下水抽排与降水难题, 减少坑底地基土扰动, 杜

绝风化砂岩产生因渗流破坏掏空地基土的现象;对于二类土岩组合地层,下部基岩一般不具透水性,地下水主要赋存于上部卵石层中,易于抽排疏干,且降水附加沉降可忽略不计,基坑地下水控制通常采用管井降水,并于土岩界面设置泄水孔,将坑外残留水引流至集水坑后排出坑外。

(3)基坑支护结构形式选择除需考虑地层条件外,还需综合考虑基坑深度、周边环境和场地条件等因素。对于一类土岩组合地层,当基坑支护需于下部风化砂岩施打锚索时,可通过采用高压旋喷锚索增大锚固段直径来提高锚索抗拔承载力,进而有效控制基坑支护结构及周边环境变形;对于二类土岩组合地层,由于下部岩层与锚固体间的粘结强度较高,一般采用常规锚索即可满足设计要求。

#### 参 考 文 献

- [1] 朱志华,刘 涛,单红仙. 土岩结合条件下深基坑支护方式研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(S1): 619-623.
- [2] 刘方克,赵海梨,张广亮. 土岩组合地层地铁基坑围护结构变形规律分析[J]. 施工技术, 2016, 45(12): 149-153.
- [3] 张传军,何 松,孙 玺,等. 青岛地区土岩组合地层基坑工程支护设计及变形分析[J]. 城市勘测, 2016, (5): 171-176.
- [4] 刘红军,于雅琼,王秀海. 土岩组合地层旋喷桩止水桩锚支护基坑变形与受力数值分析[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(11): 297-302.
- [5] 吴燕开,牛 斌. 土岩组合地层深基坑支护技术实例探讨[J]. 山东科技大学学报, 2013, 34(4): 34-39.
- [6] 庄岳欢,冯龙飞,葛 梁. 土岩二元地层深基坑复合土钉墙的应用分析[J]. 广东土木与建筑, 2015, (7): 14-32.
- [7] 龙 照,张恩祥,沈秋武,等. 兰州某土岩组合地层深基坑支护与降水[C]//第四届全国地基基础与地下工程技术交流会论文集. 中国建设科技集团股份有限公司,中国建筑学会工程建设学术委员会《施工技术》杂志社. 2015.

[1] 朱志华,刘 涛,单红仙. 土岩结合条件下深基坑支护方

收稿日期: 2022-02-28