

管井降水技术在江底取水隧道修复中的应用

车灿辉^{1,2}, 黄健³, 刘静^{1,2}

(1.安徽省地矿局第一水文工程地质勘察院,安徽蚌埠 233000; 2.安徽水文地质工程地质公司,安徽蚌埠 233000;
3.中铁十四局大盾构工程有限公司,江苏南京 210031)

摘要: 苏南某电厂江底取水隧道在掘进时发生沼气喷溢引起承压水携带泥沙涌入,隧道修复过程中需要防止承压水再次突涌,而能否通过管井降低长江水体下巨厚的承压含水层水位引起了巨大的争议。本文结合水文地质条件分析及现场抽水试验,查明目的含水层与江水及下部巨厚承压含水层之间的水力联系,得到了各层的水文地质参数,提供了可靠的降水方案,并对沉降变形进行了预测分析,解决了水上降水管井施工等一系列难题,对类似工程具有重要的借鉴意义。

关键词: 江底隧道;突涌;抽水试验;管井降水

中图分类号: TU46⁺3 **文献标识码:** B **文章编号:** 1672-7428(2019)07-0070-07

Tube well dewatering technology for repair of the water intake tunnel under the Yangtze River

CHE Canhui^{1,2}, HUANG Jian³, LIU Jing^{1,2}

(1. *The First Institute of Hydrology and Engineering Geological Prospecting Anhui Geological Prospecting Bureau, Bengbu Anhui 233000, China*;
2. *Anhui Hydrogeology and Engineering Geology Company, Bengbu Anhui 233000, China*;
3. *Large Diameter Shield Co., Ltd. of China Railway Bureau 14 Group, Nanjing Jiangsu 210031, China*)

Abstract: In the process of shield excavation of the water intake tunnel for a power plant in the south of Jiangsu, the confined water flooded the tunnel with sediments due to a gas kick. It was necessary to prevent the confined water from surging out again during the tunnel repair. Whether the water level of the massive confined aquifer under the Yangtze River can be reduced by the tube well caused a great controversy. Base on the analysis of hydrogeological conditions and field pumping tests, the hydraulic connection between the objective aquifer with the river water and the lower massive confined aquifer was found, the hydrogeological parameters of each layer was calculated, a reliable dewatering scheme was provided, and the subsidence deformation was predicted and analyzed. It also has solved a series of difficult problems such as the construction of pipe wells over water, providing important reference of similar projects.

Key words: under-river shield tunnel; kick; pumping test; well dewatering

0 引言

隧道工程为典型的地质工程,在进行隧道施工过程中,不可避免要遇到各种不良的工程地质问题。特别是水下隧道,面临地下水压高、沼气(囊)丰富等复杂工程地质状况,容易发生气体喷溢、地下水涌出以及泥沙涌出等风险,给施工带来障碍以及周边地面沉降等问题,甚或酿成重大的工程事故。

温竹茵等^[1]对上海沪崇苏特大隧道施工中可能

遇到的不良工程地质问题进行了具体的分析,并提出了详实可行的施工技术措施。该工程中涉及了江底隧道施工中经常遇到的工程地质问题。提出了钻井释放浅层沼气的措施;设计了针对承压水问题的密封装置;采用了针对管涌和流沙的技术。徐彬等^[2]就输水隧洞中存在的突发涌水问题以及塌方进行了分析,并制定了一套预防和抢险的方案。祁孝珍等^[3]针对辽宁大伙房输水隧洞的管涌突水问题进

收稿日期 2018-11-24; **修回日期** 2019-06-07 **DOI:**10.12143/j.tkgc.2019.07.012

作者简介: 车灿辉,男,汉族,1984年生,水文地质专业,硕士,主要从事水文地质研究工作,江苏省南京市建邺区江东中路311号中泰国际广场5栋1616室(221000),checanhui@126.com。

引用格式: 车灿辉,黄健,刘静.管井降水技术在江底取水隧道修复中的应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(7):70-76.

CHE Canhui, HUANG Jian, LIU Jing. Tube well dewatering technology for repair of the water intake tunnel under the Yangtze River[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019,46(7):70-76.

行了分析,并总结了几种突水的前兆标志。孙谋等^[4]就武汉长江隧道施工中存在的高水压问题进行了分析,具体针对施工开挖面的稳定以及防坍塌技术,防泥水喷发技术以及隧道上浮等关键技术进行了阐述。林朝^[5]对隧道施工冷冻法的发展进行了概述,并以广州地铁施工为例,详细介绍了施工中的冷冻方案设计和技术要点以及施工工艺,对冻结效果以及施工中的要点进行了分析。

从上述研究成果看,关于隧道施工中地质灾害问题及施工对策研究、承压含水层中隧道施工技术和地下水盾构注浆封堵与冷冻封堵技术等方面的研究成果很多,但就长江入海口进行水下隧道修复过程中的承压水控制尚无先例。鉴于此,本文以长江入海口某发电厂取水隧道修复工程为依托,针对高承压水对隧道修复带来的施工风险,提出采用管井进行水下降压降水技术方案,并进行了理论分析及现场试验,结合三维数值模拟计算分析,给出了设计及施工方案,并得以成功应用。

1 工程概况

苏南某发电厂扩建工程取水方案采用 2 条大直径的地下隧道从长江深水区取水,取水隧道位于长江入海口,处于已建或在建构物的包围中,上游有在建码头,下游仅距输煤栈桥防撞桩 40 m。隧道横穿长江大堤,在陆域仅 87 m,在长江水域长 870 m,为典型的地下水工构筑物,且建于水下软土层中,较

一般水工构筑物施工难度大,施工中潜在的地质灾害难以预测、预报。

西线隧道顺利完成了施工,但东线隧道在盾构最后一环推进施工时,发生了沼气喷溢引起承压水携带泥砂涌入险情。要修复受损隧道,必须降低⑥层承压水,同时释放地层中蕴含的沼气。

但是长江上降水的特殊性决定了降水工程的难度:(1)降水井施工、降水运行管理受江水影响较大;(2)承压含水层很可能会直接接受长江水的补给,水位无法降低;(3)下部含水层厚度大、渗透性能好,涌水量大;(4)水位降深大,降水引起的土层压缩可能对已建隧道造成较大影响。

基于以上问题,本次先从水文地质条件上分析降水的可行性;再进行现场抽水试验验证,并计算各相关含水层的水文参数;最后对整体江上降水方案进行设计及施工。

2 工程区水文地质条件分析

2.1 地层结构

根据岩土工程勘察报告,工程区大部分被第四系沉积地层覆盖,地基土由河口-滨海相第四系全新统和晚更新统松散沉积物组成。上部为第四系全新统冲击软塑—流塑淤泥质粉质粘土、粉质粘土、粉质粘土夹砂土等;下部为第四系全新统粉砂、粉细砂、粗砂等,见图 1。

2.2 水文地质条件

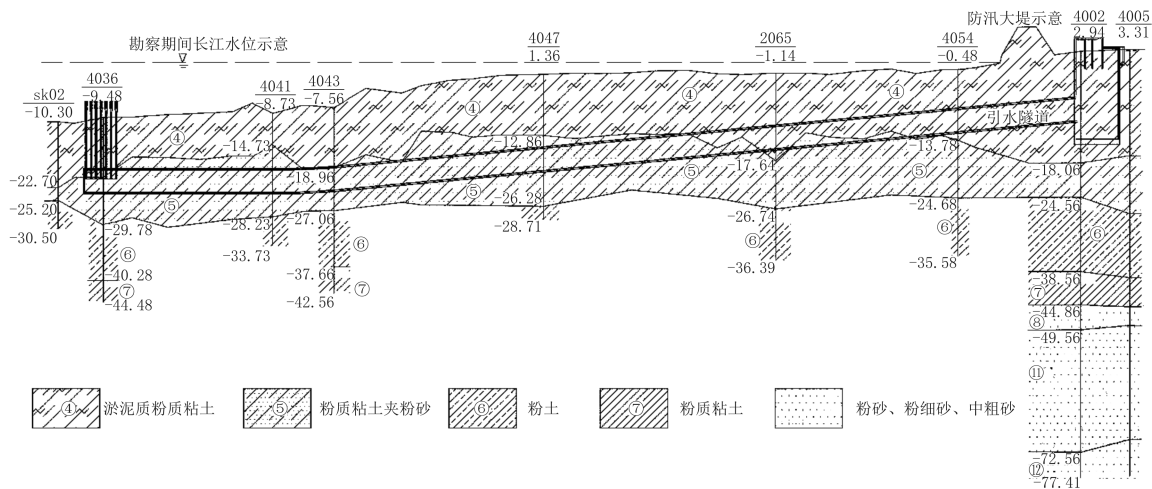


图 1 隧道地质剖面(单位:m)

Fig.1 Geological profile along the tunnel (unit: m)

工程区地表为长江水体,江底以下工程建设涉及的第四系地层存在 2 层承压水,主要分布于隧道底部

的⑥层粉土、⑧层粉砂及深部砂层中,分隔 2 层承压含水层的⑦层粉质粘土相对隔水层埋深约为 40 m,

厚度约为4 m,分布不连续,在局部可能缺失。勘察报告中将⑥层粉土、⑧层粉砂作为同一含水层考虑。

2.3 降水可行性分析

(1)隧洞顶部分布的隔水层——④层淤泥质粉质粘土层:此层是将长江这一巨大的、流动的地表水体与隧道顶面有效隔断的隔水顶板。其垂直方向上渗透系数达到 $10^{-7} \sim 10^{-8}$ cm/s量级,属不透水层;该层相对稳定,普遍厚度 >6.0 m,能有效阻隔10 m深江水垂直入渗,是本工程场地的重要工程地质隔水层组。

(2)盾构隧道推进层——⑤层粉质粘土夹粉土层:本层地下水赋存在所夹的薄层粉砂、粉土层中,富水性不丰富。夹层水平延伸不远、层位不稳定,周围被粘性土所封闭,地下水连通性差,其渗透性 10^{-5} cm/s量级,属微透水层,且水平和垂直渗透性差异不大,也正因为其相对隔水性,才能将沼气等可燃气体封闭保存在所夹砂性土透镜体中。该层与上覆④层共同构成相对隔水层,也可有效阻止江水入渗。

(3)隧道底部第一承压含水层——⑥层粉土层:本层的特点是以粉粒土为主的含水层,受沉积环境的影响,夹有薄层的粉砂或粉质粘土,使含水层在垂直方向有各向异性的特点,其水平渗透系数要大于垂直渗透系数,勘察报告给出其 $K_H = 2.3 \times 10^{-5}$ cm/s、 $K_V = 1.5 \times 10^{-5}$ cm/s。本层的砂土密实状态为中密,因其颗粒细又有粘性土薄层分布,水量不大,但水头压力高。其高水头是造成隧道底板突涌的最主要原因,是本次降水的目的含水层,主要以减压降水为目的。

(4)隧道底部第一承压含水层隔水底板——⑦层粉质粘土层:勘察报告认为本层厚度小,分布不均匀,局部缺失,忽视其隔水功能,认为⑥层粉土与下伏的⑧、⑪、⑫层共同构成了统一的承压水含水层。经仔细分析⑦层的沉积环境和区域分布范围,发现该层分布应该较稳定,其陆域厚度大,可达10余米,而江底厚度虽薄,也达4~5 m,其隔水作用不可忽视。可切断或减少⑥层粉土与⑧层粉砂垂直方向的水力联系,有利于分层控制、减少降水抽水量,减小降落漏斗的半径。

(5)隧道底部第二承压水含水层——⑧层粉砂及深部砂层:本层的颗粒粒径较⑥层粗、厚度大,渗透性能要远高于⑥层,已有钻孔资料显示,100 m深度范围内未揭穿此层。一旦该层与降水目的含水层

水力联系密切,将大大增加总涌水量、降水难度及隧道修复风险。

从上述水文地质结构剖析,本场地具备在江面对隧道底部第一承压含水层中的高承压水头进行减压降水的岩土环境条件和水文地质结构条件。

3 现场抽水试验验证

3.1 试验目的

现场抽水试验的主要目的在于验证目的含水层的水头压力能否降低,并为降水井的设计、施工提供可靠的依据,具体如下:

(1)查明目的含水层(第一承压含水层)与长江水体、第二承压含水层之间的水力联系程度;

(2)求取目的含水层的水文地质参数,如渗透系数、影响半径、单井涌水量等;

(3)通过试验观测,分析降水可能对已建隧道造成的影响;

(4)提供合理可行的降水方案。

3.2 试验井布置

为防止试验对已建隧道产生影响,在东线隧道的东侧布置4口试验井,其中3口井滤管设置在第一承压含水层中(编号1、2、4),1口井滤管设置在第二承压含水层中(编号3),见图2、3。

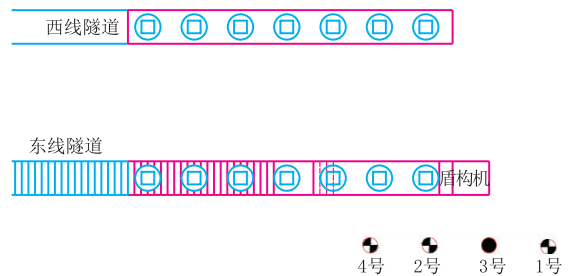


图2 试验井平面位置

Fig.2 Test well plane position

3.3 试验井施工

试验井施工充分克服了长江上定位、施工、止水等一系列难题。施工时选用了1条大吨位的驳船作为本次试验井施工、抽水试验船只。

3.3.1 平台搭建

采用旁侧式钻探平台,平台外伸3.0 m,宽 >6 m,下悬挂副平台,两平台上下距离 ≥ 2.0 m。上平台面用厚度 ≥ 50 mm的木质地板铺设、固定,下平台面用钢丝网铺设,上下平台配备必要的防护栏杆,平台的孔口槽板应拆卸方便,以便遇紧急情况撤离。

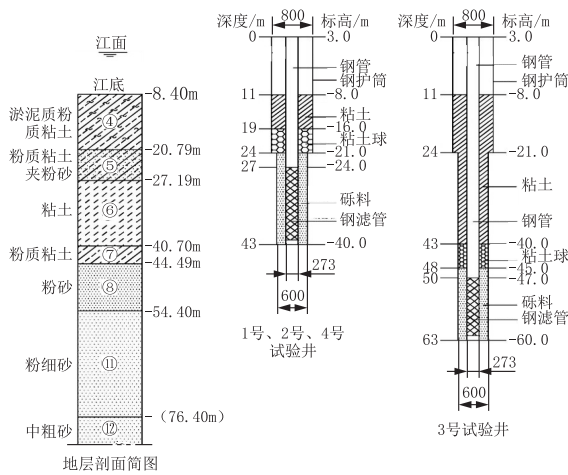


图 3 试验井结构
Fig.3 Test well structure

3.3.2 锚泊定位

施工船采用抛锚泊位, 配备至少 4 只铁锚, 形为齿状, 呈米型布置, 备用锚 1 只, 当某一侧锚因水流方向变化出现微走锚时, 在可能造成平台船漂移的最大流向方向上增补, 提高船在施工时抗漂移的能力。

降水井定位工作采用 GPS 双频 RTK 系统和实时差分系统进行, 同时在岸上采用全站仪进行校核。

3.3.3 护管及成孔

试验井施工时, 选用高强度的 $\text{O}800\text{ mm}$ 优质钢管作隔水保护套管, 采用 60 t (600 kN) 震动锤将护筒插入江底地层中 8 m 以上, 采用 $\text{O}600\text{ mm}$ 三翼钻头成孔。

井管提前包扎好备用。下管时, 用船吊垂直提吊井管下入孔内, 使其位于钻孔中心, 滤管外侧捆扎扶正器, 确保滤管外侧滤料层的厚度均匀, 且大于规范中的最小厚度。

3.3.4 填砾、止水

- (1) 填砾料前先换浆, 保证砾料顺利下沉;
- (2) 采用井管外通水填砾料法, 填砾中途不宜停泵;
- (3) 填砾时砾料沿井管四周均匀连续投入, 填砾

速度要适当, 随填随测填砾深度;

试验井采用 $\text{O}2\sim 3\text{ cm}$ 优质粘土球止水, 止水层厚度约为 5 m, 上部至孔口段用粘土回填密实。

3.3.5 洗井、试抽

下管填砾后立即进行洗井工作。洗井主要采取冲水头洗井, 直至洗清为止。洗井结束后, 及时进行试抽水, 以检验井深、单井涌水量、出水含砂量等情况是否符合要求。

3.4 试验数据

试验过程中, 采用全自动水位观测记录仪进行水位数据采集, 利用水表进行流量采集。

考虑长江潮汐的影响, 正式试验前 3 天, 分别对地下水水位及江水位进行观测, 三者之间具明显的水位差, 可见三者之间无直接水力联系, 见图 4。

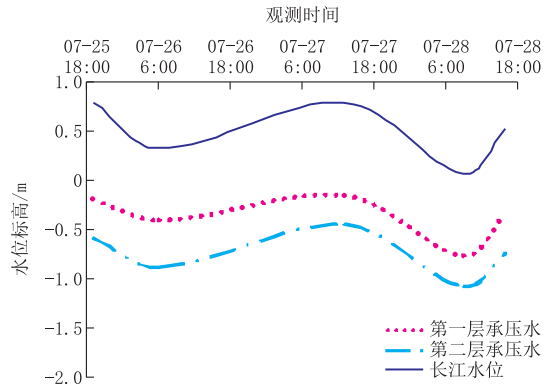


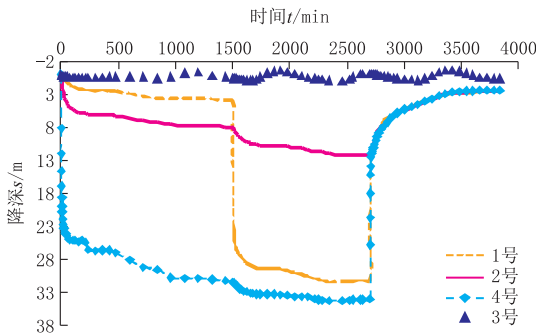
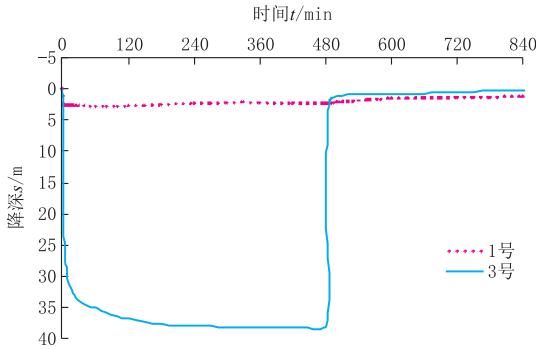
图 4 地下水水位与江水位关系曲线
Fig.4 Groundwater vs river level curve

第一承压含水层单井出水量约为 $400\text{ m}^3/\text{d}$, 单位涌水量 $q_1 = 0.155\text{ L}/(\text{s} \cdot \text{m})$, 主井水位降深 31 m, 同层观测井水位分别下降了 7.98、3.94 m, 而第二承压含水层观测井水位基本无变化; 第二承压含水层单井出水量约为 $1600\text{ m}^3/\text{d}$, 单位涌水量 $q_2 = 0.482\text{ L}/(\text{s} \cdot \text{m})$, 主井水位降深 37.96 m, 而第一承压含水层水位基本无变化, 见表 1、图 5、图 6。反映出两含水层之间水力联系差, 也间接判断了 ⑦ 层粉质粘土的稳定隔水性能。

表 1 抽水试验结果
Table 1 Pumping test results

含水层位	抽水井编号	稳定延续时间/h	观测井水位降深 s/m				流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	备注
			1	2	4	3		
第一承压含水层	4	24	3.94	7.98	31*	△	416.0	单井抽
	1	20	30.96*	12.07	34.03*	△	430.0	两井抽
4	366.4							
第二承压含水层	3	8	△	△	△	37.96	1581.3	单井抽

注: 标“*”表示主井水位, “△”表示未观测到水位有明显下降。

图5 第一承压含水层抽水 $s-t$ 曲线Fig.5 s vs t curve of the first confined aquifer图6 第二承压含水层抽水 $s-t$ 曲线Fig.6 s vs t curve of the second confined aquifer

抽水试验过程中,对护筒及西线隧道进行沉降监测,未观测到地层有明显的沉降。

3.5 参数计算

3.5.1 第一承压含水层

选用带 2 个观测井的承压含水层完整井公式:

$$K = \frac{0.366Q}{M(s_1 - s_2)} \lg \frac{r_2}{r_1} \quad (1)$$

$$\lg R = \frac{s_1 \lg r_2 - s_2 \lg r_1}{s_1 - s_2} \quad (2)$$

式中: K ——渗透系数, m/d ; Q ——抽水量, m^3/d ; r_1 、 r_2 ——两个观测井至抽水井的水平间距, m ; s_1 、 s_2 ——两个观测井内的水位降深, m ; M ——含水层厚度, m ; R ——影响半径, m 。

将试验数据代入式(1)、(2),计算得到第一承压含水层渗透系数为 1.508 m/d ,影响半径为 70 m ,见表 2,根据相关工程经验,砂性地层的影响半径可达

表 2 第一承压含水层计算参数

Table 2 Calculation parameters of the first confined aquifer

Q	r_1	r_2	M	s_1	s_2	K	R
416	24	8	12	3.94	7.98	1.508	70

500 m 左右,计算值偏小,建议影响半径按 300 m 取值。

3.5.2 第二承压含水层

该层仅布置 1 口非完整井抽水,且无观测井,选用承压非完整井单孔抽水计算公式:

$$K = \frac{0.366Q}{ls_w} \lg \frac{1.6l}{r_w} \quad (3)$$

$$R = 10s_w \sqrt{K} \quad (4)$$

式中: r_w ——抽水主井井径, m ; s_w ——抽水主井水位降深, m ; l ——过滤器长度, m 。

将试验数据代入式(3)、(4),计算得到第二承压含水层渗透系数为 2.75 m/d ,影响半径为 630 m ,见表 3,考虑到主井井损的影响,计算结果偏小。

表 3 第二承压含水层计算参数

Table 3 Calculation parameters of the second confined aquifer

Q	r_w	s_w	l	K	R
1581.3	0.1325	37.96	12	2.75	630

4 隧道修复降水方案

4.1 降水井布置

考虑到地质条件复杂,在东线隧道继续施工期间隧道外部降水、隧道抽水、外套管下沉等施工时,将不可避免的对隧道周围土体产生一定程度的影响。为减小对已通水的西线隧道产生较大的不利影响,在两条隧道之间采取高压旋喷桩隔离,旋喷桩深入⑦层粉质粘土层 1 m ,离东线隧道外侧 6 m 。

降水井布置时采用三维数值模拟软件进行分析计算,即根据工程的地质和水文地质条件,建立本工程地下水渗流三维计算数值模型(图 7),再将抽水试验数据代入模型,对降水进行模拟分析,得到降水后的等水位线图(图 8)。

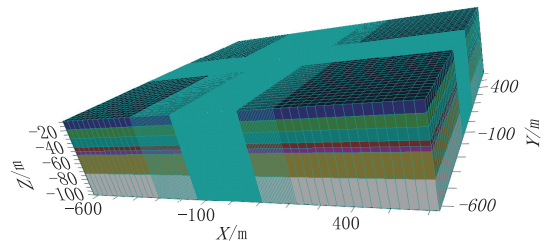


图 7 三维数值模型离散图

Fig.7 Discrete diagram of the three-dimensional numerical model

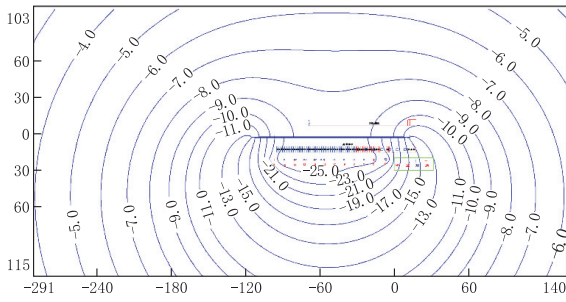


图 8 第一层承压含水层水位标高(m)等值线图

Fig.8 Water level contour of the first confined aquifer

从图 8 可看出,受隔离墙的影响,当修复段水位降至设计要求标高-25.0 m,已建西线隧道附近最大水位降至标高-10.0 m,隔离墙的绕流阻水效果明显。总涌水量约 1500 m³/d,考虑群井干扰影响,单井出水量按抽水试验时单井出水量的一半考虑,即 200 m³/d,共在隧道东侧布置了 12 口降水井(包含 4 口备用观测井),降水井结构与试验井相同。

4.2 变形分析

降水引起地层的沉降主要有以下 2 个因素:(1)降水过程中,地层中大量的细颗粒随降水井抽水被带走,导致地层沉降,此种沉降一般会产生较大的不均匀沉降,具有很大的破坏性;本次施工过程中,降水井出水含砂率<1/10 万,避免了细颗粒被带走而产生的地层沉降。(2)含水层(组)内地下水位的降低,导致土层内液压降低,颗粒间的有效应力增加,从而导致松散类含水层(组)骨架发生压密引起地面沉降,此种沉降等值线与水位等值线形状相同,不均匀沉降较小。

对于④层淤泥质粉质粘土层,其上部有约 10 m 深的地表水体,在降水过程中,可以始终保持该层不失水,模拟计算的结果同样表明该层水位未发生变化,该层虽为高压缩性土,但在降水过程中,该层不会产生失水固结沉降。对于第二承压含水层,其与第一承压含水层之间存在⑦层粉质粘土,且降水井滤管并未设置到第二承压含水层当中,降水过程中,该层水位不下降,可以不考虑该层因水位降低引起的地层沉降。

综合分析,降水过程中会因水位下降而产生沉降的地层主要是⑥层粉土,而地层沉降对已建隧道的的影响主要表现在不均匀沉降可能会造成已建隧道管片的拉裂。累计沉降量可采用《建筑基坑支护技术规程》(JGJ 120-2012)^[6]中沉降计算公式:

$$S = \psi_w \sum \frac{\Delta \sigma'_{zi} \Delta h_i}{E_{si}} \quad (5)$$

式中: S ——计算剖面的地层压缩变形量, m; ψ_w ——沉降计算经验系数,本次取 1.0; $\Delta \sigma'_{zi}$ ——降水引起的地面下第 i 土层的平均附加有效应力, $\Delta \sigma'_{zi} = \gamma_w z$, kPa; γ_w ——水的重度, 10 kN/m³; z ——计算点的水位降深, m; Δh_i ——第 i 层土的厚度,取 12 m; E_{si} ——第 i 层土的压缩模量,取 16.25 MPa。

根据图 8 的水位数据,可计算出各点的累计沉降量,东线隧道最大沉降量约为 189 mm,最大不均匀量为 1.1 mm/m,西线隧道最大累积沉降量约为 77 mm,不均匀沉降约 0.58 mm/m,见图 9。虽然累积沉降量较大,但不均匀沉降量小,对已建隧道的的影响小。

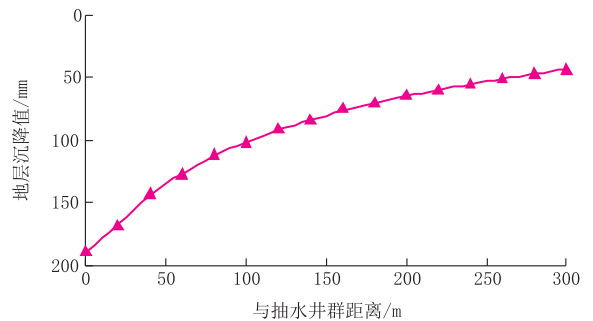


图 9 东线隧道累计沉降量与距离关系曲线

Fig.9 Curve of cumulative subsidence vs distance of the eastern line tunnel

5 结论与体会

本工程采用水下管井降水取代气压门作为隧道修复过程中的安全备用措施,同时又通过降水井释放了地层中蕴含的丰富沼气,提高了工程的安全性。通过本工程的实施,得到以下几点体会:

(1)地下工程面临的问题绝大多数是地下水的问题,对地下水的理解与认识是避免及解决地下工程事故的首要前提。

(2)本工程中,通过对场地水文地质结构进行剖析,查明江水及下部巨厚的承压含水层与目的含水层水力联系程度差,认为可通过降水的方式来预防隧道修复过程中再次突涌问题,并通过现场抽水试验进行了验证,最后对整体江上降水方案进行设计施工。

(3)水位下降引起的沉降主要是均匀沉降,对形状构筑物,造成破坏的主要是不均匀沉降;施工中,

应严格控制降水井质量,确保单井出水量及出水含砂率均满足要求,防止地层细颗粒流失引起不均匀沉降。

由于本工程降水是作为备用措施,并未进行长期连续的降水,未观测到隧道沉降变化,在今后类似工程中,应加强对地层沉降的研究。

参考文献(References):

- [1] 温竹茵,陈宝.沪崇苏隧道施工中将遭遇的不良地质条件及其防范措施[J].工程勘察,2005(6):32-34.
WEN Zhuyn, CHEN Bao. Construction measures to prevent from undesirable geological conditions in the Hu - Chong - Su tunnel project[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2005(6):32-34.
- [2] 徐彬,王昂峰.软土水库输水隧洞施工突发涌水的预防和抢险[J].浙江水利科技,2013,41(4):92-94.
XU Bin, WANG Angfeng. Prevention and rescue of sudden water gushing in construction of water conveyance tunnel of Qincun Reservoir[J]. Zhejiang Hydrotechnics, 2013,41(4):92-94.
- [3] 祁孝珍,张晓利.隧洞施工过程中渗水及突发涌水的防治[J].水利水电技术,2008,39(2):40-41.
QI Xiaozhen, ZHANG Xiaoli. Prevention and control of water seepage and sudden water inrush during tunneling[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2008,39(2):40-41.
- [4] 孙谋,谭忠盛.盾构法修建水下隧道的关键技术问题[J].中国工程科学,2009,11(7):18-23.
SUN Mou, TAN Zhongsheng. Key technologic problems on underwater shield tunnel[J]. Engineering Sciences, 2009,11(7):18-23.
- [5] 林朝.论水平冷冻法在地铁暗挖隧道工程中的运用[J].西部探矿工程,2009,21(4):170-172.
LIN Chao. Application of horizontal freezing method in subway tunnel construction[J]. West-China Exploration Engineering, 2009,21(4):170-172.
- [6] JGJ 120-2012,建筑基坑支护技术规程[S].北京:中国建筑工业出版社,2012.
JGJ 120-2012, Technical specification for retaining and protection of building foundation excavations[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.
- [7] JGJ 111-2016,建筑与市政工程地下水控制技术规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2016.
JGJ 111-2016, Technical code for groundwater control in building and municipal engineering[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016.
- [8] 杜欣,曾亚武,唐冬云.基于水下抽水试验的岩体渗透系数研究及应用[J].岩石力学与工程学报,2010,29(S2):3542-3548.
DU Xin, ZENG Yawu, TANG Dongyun. Research on permeability coefficient of rock mass based on underwater pumping test and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010,29(S2):3542-3548.
- [9] 杨冬雪,李志虎.拉萨地区邻河基坑管井降水案例分析[J].探

矿工程(岩土钻掘工程),2018,45(7):90-93.

YANG Dongxue, LI Zhihu. Case analysis of tube well dewatering of the foundation pit neighboring river in Lhase region[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2018,45(7):90-93.

- [10] 李洪财.南京长江江心洲超大直径盾构接收井明挖段超深基坑降水技术研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2018,45(5):87-92.
LI Hongcai. Study on dewatering technology of ultra-deep foundation pit in opening cut section of super-large diameter shield receiving well in river island of Nanjing Yangtze River [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2018,45(5):87-92.
- [11] 汤建铭,王钰.珠江特大桥承台基坑突涌事故处理降水设计与施工[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2018,45(11):50-55.
TANG Jianming, WANG Yu. Dewatering design and implementation for treatment of water kick-in at a bridge cap foundation pit in the Pearl River [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2018,45(11):50-55.
- [12] 葛鹏,胡远,左新明.扬中金源时代购物中心基坑降水数值模拟分析[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(4):63-69.
GE Peng, HU Yuan, ZUO Xinming. Numerical simulation analysis of foundation pit dewatering at Yangzhong Jinyuan Times Shopping Center [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019,46(4):63-69.
- [13] 周子侯,秦志泉.单孔稳定流抽水试验计算渗透系数对比研究[J].矿产勘查,2018,9(4):706-713.
ZHOU Ziyu, QIN Zhiquan. Comparison of the permeability coefficients for single hole steady water pumping test [J]. Mineral Exploration, 2018,9(4):706-713.
- [14] 车灿辉.巨厚非均质潜水含水层抽水试验及参数计算[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2018,45(11):60-64.
CHE Canhui. Pumping test and calculation of hydrogeological parameters for massive anisotropic phreatic aquifer [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2018,45(11):60-64.
- [15] 胡云华.临江高承压水超深基坑开挖抗突涌分析与对策——以南京纬三路长江隧道梅子洲风井基坑为例[J].隧道建设,2015,35(11):1194-1201.
HU Yunhua. Analysis on and countermeasures for water inrush in construction of ultra-deep foundation pit at riverside under high confined water: case study on deep foundation pit of Meizhou Ventilation Shaft of Weisanlu River-crossing Tunnel in Nanjing [J]. Tunnel Construction, 2015,35(11):1194-1201.
- [16] 唐卓华,杨新安,徐前卫,等.富水砂层盾构脱困降水方案设计与效果分析[J].现代隧道技术,2016,53(4):172-178.
TANG Zhuohua, YANG Xin'an, XU Qianwei, et al. Design of dewatering plan for trapped shield in water-rich sand stratum and its effect analysis [J]. Modern Tunnelling Technology, 2016,53(4):172-178.