

DOI: 10.11779/CJGE2024S20043

# 长江漫滩区明挖隧道基坑降承压水环境影响研究

王峻<sup>1</sup>, 刘松玉<sup>\*2</sup>, 张心源<sup>1</sup>, 徐海源<sup>1</sup>, 王晓琼<sup>3,4</sup>, 李世龙<sup>3,4</sup>, 孙彦晓<sup>2</sup>

(1. 江苏省交通工程建设局, 江苏 南京 210007; 2. 东南大学, 江苏 南京 211189; 3. 中铁十四局集团有限公司, 山东 济南 250101;

4. 中铁十四局集团大盾构工程有限公司, 江苏 南京 211800)

**摘要:** 长江漫滩区地质条件复杂, 承压水位高, 明挖隧道基坑降承压水可能会引起一定程度的沉降, 进而引起建筑物破坏及生命财产损失。针对该问题, 以江阴靖江长江隧道江南标段明挖隧道基坑工程降水施工为例, 建立了降承压水有限元模型, 分析了邻近敏感别墅区的水位降深、沉降及倾斜特性, 并研究了不同止水帷幕设计对沉降的影响。结果表明, 降承压水引起的地表沉降稳定速度较慢, 降水 10, 30, 60, 120 d 时, 别墅区最大沉降为 2.5, 4.3, 5.4, 6.1 cm。倾斜稳定相对较快, 最大倾斜约 0.0002, 满足规范要求。本工程止水帷幕设计变更方案可使别墅区最大沉降降低 63.5%。在基坑主线将第二承压含水层隔断可最高效地进一步降低别墅区最大沉降。

**关键词:** 明挖隧道基坑; 承压水; 降水; 环境影响; 数值模拟

中图分类号: TU46.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2024)S2-0221-05

**作者简介:** 王峻(1973—), 男, 正高级工程师, 主要从事桥隧工程管理工作。E-mail: 1523700598@qq.com。

## Environmental effects of confined aquifer dewatering for cut and cover tunnels in floodplain areas of Yangtze River

WANG Jun<sup>1</sup>, LIU Songyu<sup>2</sup>, ZHANG Xinyuan<sup>1</sup>, XU Haiyuan<sup>1</sup>, WANG Xiaoqiong<sup>3,4</sup>, LI Shilong<sup>3,4</sup>, SUN Yanxiao<sup>2</sup>

(1. Jiangsu Provincial Transportation Engineering Construction Bureau, Nanjing 210004, China; 2. Southeast University, Nanjing 211189,

China; 3. China Railway 14th Bureau Group Co., Ltd., J'nan 250101, China; 4. China Railway 14th Bureau Group Mega Shield

Construction Engineering Co., Ltd., Nanjing 211800, China)

**Abstract:** Confined aquifer dewatering for cut and cover tunnels in the floodplain areas of Yangtze River characterized by complicated geological condition and high confined water level may result in considerable ground settlements, which may potentially cause structural damages and losses of life and property. Aiming at this issue, the finite element model for the confined aquifer dewatering is developed based on the southern part of a cut and cover tunnel of the Jiangyin-Jingjiang Yangtze River Tunnel Project, and the characteristics of drawdown, ground settlement and incline of a sensitive villa district are analyzed. The effects of various designs of curtain on the ground settlements are also studied. It is found that the settlements induced by the confined aquifer dewatering cannot converge fast. The maximum settlements of the villa district for 10, 30, 60 and 120 days of dewatering are 2.5, 4.3, 5.4 and 6.1 cm, respectively. The inclines converge faster with the maximum value of 0.0002, which meets the requirements of China's standard. The altered curtain design can reduce the maximum settlement in the villa district by 63.5%. Cutting off the second confined aquifer in the mainline can further reduce the maximum settlement with the highest efficiency.

**Key words:** cut and cover tunnel; confined water; dewatering; environmental effect; numerical simulation

## 0 引言

长江漫滩区地质条件复杂, 承压水位高, 明挖隧道基坑降承压水会引起一定程度的环境效应。针对该问题, 李方明等<sup>[1]</sup>总结了多个长江漫滩区地铁深基坑变形实测资料, 并结合数值模拟结果, 发现降水引起的沉降约占施工总沉降的一半。由于长江漫滩区存在深厚承压含水层, 隔断式止水帷幕造价昂贵, 因此常见悬挂式止水帷幕的应用<sup>[2]</sup>。与隔断式帷幕相比, 悬

挂式帷幕未将承压层隔断, 坑内外存在水力连通, 导致坑外具有一定降深, 因此降水引起的变形明显偏大。何绍衡等<sup>[3]</sup>、Xie 等<sup>[4]</sup>通过数值模拟研究了帷幕插入深度的影响, 发现采用悬挂式帷幕时坑外沉降超过采用

**基金项目:** 国家自然科学基金项目 (41972269, 52178384, 52008098);

江苏省交建局项目 (2021QD05)

**收稿日期:** 2024-06-22

**\*通信作者** (E-mail: liusy@seu.edu.cn)

隔断式帷幕情况的 2 倍。周火垚等<sup>[5]</sup>总结了某采用悬挂式帷幕基坑的监测资料,发现周边民宅沉降最高可达 102 mm,且局部倾斜即将超过规范<sup>[6]</sup>限值。可见,长江漫滩区采用悬挂式帷幕的基坑降承压水引起的环境效应较显著,应受到足够重视,以确保周边环境安全。

准确预测降承压水引起的环境效应并明确影响规律,对于变形控制及周边建构筑物的保护具有重要指导作用。本文依托江阴靖江长江隧道江南标段明挖隧道基坑工程,利用数值模拟方法分析了降承压水引起的环境影响,以验证设计的合理性,并研究了不同帷幕设计对别墅区沉降影响,以期为类似工程提供参考。

## 1 工程背景

### 1.1 工程概况

江阴靖江长江隧道位于江阴大桥与泰州大桥之间,主线总长约 6445 m。隧道分为江北明挖段、盾构段、江南明挖段。其中,江南段由工作井、暗埋段、敞开段等组成,总长约 785 m,如图 1 所示。此外,江南段还包括两个互通匝道工程。场地西侧存在别墅区,与主线基坑最近约 200 m,与 A 匝道基坑最近仅 50 m,极易受降承压水影响,因此,有必要分析降承压水引起的环境影响,以针对性地提出保护措施。

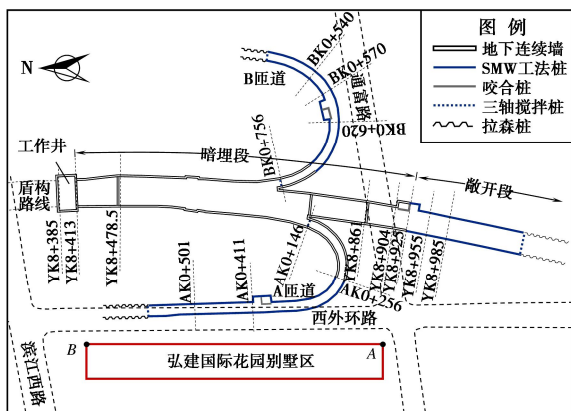


图 1 江南明挖隧道基坑平面布置

Fig. 1 Plane layout of southern part of cut and cover tunnel

### 1.2 工程地质与水文地质条件

场地自上而下依次为①杂填土、②素填土、③粉质黏土、③<sub>2-1</sub>粉质黏土、③<sub>2</sub>粉土、③<sub>3</sub>粉砂、③<sub>3-2</sub>粉砂、③<sub>4</sub>粉砂、③<sub>5</sub>粉质黏土、④<sub>2</sub>粉质黏土、④<sub>2-1</sub>细砂、④<sub>4</sub>粉细砂、④<sub>5</sub>中粗砂等。图 2 为钻孔数据平均后得到的土层划分剖面图及对应参数。需指出,图中对性质较为接近的土层进行了归并。场地地坪标高为 5.0 m。地层有两个承压含水层,为与江北地质条件统一,其命名分别为第二、三层承压含水层(记为 AqII 和 AqIII),各层深度范围如图 2。另有两个弱透水层,记为 AdII 和 AdIII。根据水位观测,潜水面平均高程约 3.85 m, AqII、III 水位平均高程分别约 0.91 和 -0.43 m。

### 1.3 基坑设计

表 1 总结了有降压需求区段的基坑设计情况。其中,安全降深为承压水位与通过式(1)<sup>[6]</sup>得出的安全水位之差。需指出,若开挖面位于承压层,则需将水位降至开挖面以下 1 m;若某区段承压层被帷幕隔断,即使式(1)表明该区段需降压,但由于坑内外无水力联系,其降水性质为疏干,故不列于表中。另外,由于 A 匝道基坑有降压需求,且距敏感别墅区较近,因此,施工方变更了 AK0+146-411 区段帷幕插入深度,并在 AK0+411 处增设横向隔断墙,将该区段完全隔断,以降低对别墅区影响。

$$\frac{\sum h_i \gamma_{si}}{H_w \gamma_w} \geq F_s \quad (1)$$

式中:  $h_i$  为基底至承压层之间第  $i$  层土的厚度 (m);  $\gamma_{si}$  为基底至承压层之间第  $i$  层土的重度 ( $\text{kN/m}^3$ );  $H_w$  为承压层顶部压力水头 (m);  $\gamma_w$  为水重度 ( $\text{kN/m}^3$ );  $F_s$  为安全系数,取 1.10。

## 2 数值模拟

### 2.1 有限元模型

利用 ABAQUS 建立降承压水分析模型。考虑计算成本及基坑尺寸,设定模型长度、宽度及深度分别为 2600, 2400, 120 m。约束土体侧面法向位移和底面所有方向位移,允许地表自由运动。固定土体侧面潜水及承压层孔压,其孔压分布对应上文描述的水位。土体网格采用耦合孔压的 8 节点六面体实体单元 (C3D8P) 及 6 节点实体单元 (C3D6P) 描述,帷幕采用 8 节点六面体线性减缩积分单元 (C3D8R) 描述,采用近密远疏原则划分网格,模型如图 3 所示。采用摩尔库伦模型描述填土层,具体参数取值为:层厚 1.95 m,  $\gamma$  为  $18.8 \text{ kN/m}^3$ ,  $e$  为 0.83, 泊松比  $\mu$  为 0.3,  $c'$  为 20 kPa,  $\phi'$  为  $19^\circ$ ,  $K_h$  和  $K_v$  均为 1.73 m/d。弹模  $E$  用  $E_s$  与一系数  $\alpha$  相乘得出<sup>[7]</sup>,本文取  $\alpha=5$ ,故  $E$  取 19.25 MPa。采用修正剑桥模型描述其余土体,其中,正常固结线斜率  $\lambda$  与卸荷再加载线斜率  $\kappa$  分别利用式(2), (3) 得出;临界状态线斜率  $M$  利用式(4)得出<sup>[8]</sup>。表 2 为填土下方土层参数。

$$\lambda = C_c / \ln 10 \quad (2)$$

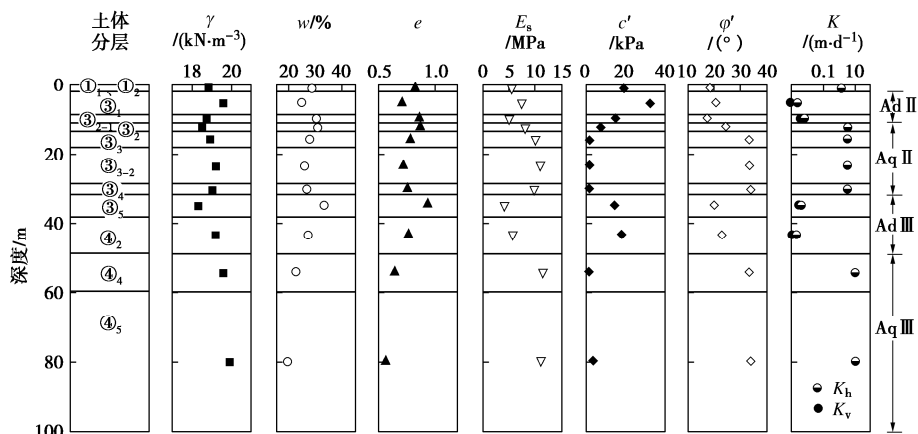
$$\kappa = C_s / \ln 10 \quad (3)$$

$$M = \frac{6 \sin \phi'}{3 - \sin \phi'} \quad (4)$$

式中:  $C_c$  为土体压缩指数;  $C_s$  为土体回弹指数。

### 2.2 计算过程

首先,对模型施加重力和地应力预定义场,还原



注:  $\gamma$ 为重度;  $w$ 为含水率;  $e$ 为孔隙比;  $E_s$ 为压缩模量;  $c'$ 为有效黏聚力;  $\varphi'$ 为有效内摩擦角;  $K$ 为渗透系数,  $K_h$ 和 $K_v$ 表示水平和竖向

图 2 场地土层划分及土体性质

Fig. 2 Soil profile and properties of different layers

表 1 基坑降水承压水区段细节汇总

Table 1 Summary of excavation details for zones requiring confined aquifer dewatering

含水层	区段	帷幕深度/m	插入比	开挖深度/m	安全降深/m
AqII	YK8+861-925 (暗埋段)	21~19	0.48~0.39	10.96~8.78	7.87~4.06
	YK8+925-985 (敞开段)	19~16.5	0.39~0.27	8.78~7.08	4.06~0.61
	AK0+146-411 (A 匝道)	27~18 (34)	0.77~0.34 (1.0)	13.47~8.2	10.38~3.71 (0)
	AK0+411-501 (A 匝道)	16.5~15	0.27~0.20	8.2~5.45	3.71~0
	KB0+756-620 (B 匝道)	28~21.5	0.82~0.51	15.67~9.3	12.58~6.21
	KB0+620-570 (B 匝道)	18.5~15.5	0.36~0.22	9.3~6.54	6.21~0
AqIII	YK8+385-413 (工作井)	63.90	0.29	33.10	17.9
	YK8+413-478.5 (暗埋段)	48.5	0	28.95~22.74	11.11~0

注: 插入比定义为帷幕插入含水层的深度与含水层厚度比值; “( )” 中为设计变更后的数值。

表 2 填土下方土体计算参数

Table 2 Input parameters for soils under fill

层序	名称	厚度/m	$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	$\mu$	$e$	$\lambda$	$\kappa$	$M$	$e_1$	$K_v/(\text{m}\cdot\text{d}^{-1})$	$K_h/(\text{m}\cdot\text{d}^{-1})$
③ <sub>1</sub> 、③ <sub>2-1</sub>	粉质黏土	9.78	19.8	0.35	0.75	0.0552	0.00664	0.91	0.99	0.0018	0.0044
② <sub>2</sub>	粉土	2.38	18.5	0.3	0.88	0.0704	0.00782	0.97	1.22	4.47	4.47
③ <sub>3</sub> 、③ <sub>3-2</sub> 、③ <sub>4</sub>	粉砂、粉细砂	18.45	19.1	0.23	0.75	0.0534	0.00757	1.38	1.04	4.47	4.47
③ <sub>5</sub> 、④ <sub>2</sub>	粉质黏土	17.05	18.9	0.35	0.83	0.0933	0.01263	0.88	1.38	0.0020	0.0035
④ <sub>2-1</sub> 、④ <sub>4</sub> 、④ <sub>5</sub>	粉细砂、中粗砂	71.19	19.8	0.23	0.58	0.0534	0.01200	1.38	0.94	12.64	12.64

注:  $e_1$ 为土体平均有效主应力为 1 kPa 时的孔隙比, 即 MCC 模型正常固结线的截距; 其余参数同上文所述。

地层初始应力状态, 并激活帷幕。随后, 将承压层顶部孔压降至与表 1 中安全水位降深相匹配的值。

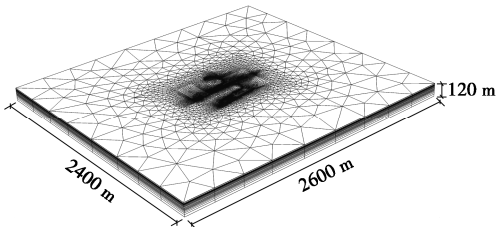


图 3 有限元模型

Fig. 3 Finite element model

3 计算结果

3.1 水位降深

图 4 为降水 60 d 时 AqII、III 顶部降深云图。需

指出, 承压层顶降深稳定较快, 稳定后水位变化不大, 因此仅展示 60 d 的情况。可知, 在变更的方案下, 主线东侧 AqII 层顶降深明显高于西侧。别墅区南侧降深约 1.5 m, 向北递减。南北两侧降深差异可解释为, 主线及 B 匝道的 AqII 降水区段更接近别墅南侧, 且帷幕未隔断 AqII; 而 A 匝道较长范围内 AqII 被隔断, 且未隔断区域降深低, 影响有限, 故南侧受影响更大。由图 4 (b) 可知, 对于 AqIII 层顶降深, 别墅北侧更靠近需对 AqIII 降水区域, 故降深更大, 最大约 2.5 m, 而南侧约 1.5 m。

3.2 地表沉降与倾斜

别墅区最大地表沉降发生在最南部。随着降水不断持续, 地表沉降逐渐增大, 降水 10, 30, 60, 120 天的最大沉降值分别为 2.5, 4.3, 5.4, 6.1 cm。图 5 展示了降水 120 d 对应的地表沉降云图。沉降持续发

展的原因可解释为, 降承压水时, 承压层水力补给较为充足, 水位稳定快, 固结也会很快完成。然而, 弱透水层并非完全不透水, 其中存在流向承压层的渗流, 导致弱透水层孔压降低, 有效应力增大, 从而发生固结。由于弱透水层渗透系数较低, 因此固结时间较长, 故地表沉降持续发展。图 6 为 A 点若干深度处归一化降深值  $s/s_{120}$  (降深  $s$ /降水 120 d 的降深  $s_{120}$ ) 与时间关系。可知, 承压层  $s/s_{120}$  随时间发展相对较快, 尤其是 AqIII, 降水 20 d 后基本稳定。AqII 层相对较慢, 这是因为其渗透系数低于 AqIII。弱透水层的  $s/s_{120}$  发展速度较慢, 但 AdIII 层发展速度相对较快, 甚至与 AqII 层相近, 这可能是由于 AdIII 上下两个承压层均有降水, 导致 AdIII 层中存在向上下两个承压层方向的渗流, 因此降深发展较快, 而 AdII 中仅有流向 AqII 的渗流, 故发展最慢。

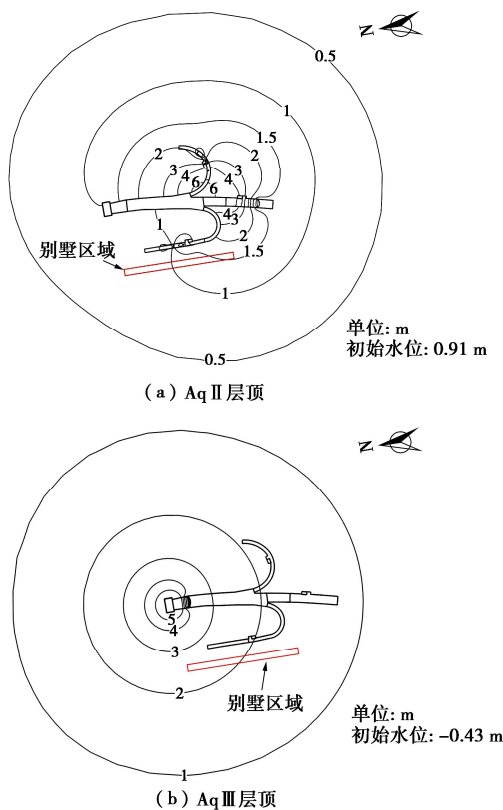


图 4 降水 60 d 引起的水位降深云图

图 7 为不同降水时间对应的别墅区倾斜, 正值表示向东或南发生倾斜。可知, 南北向倾斜在降水 60 d 后变化不大, 而东西向倾斜在降水 30 d 后便无太大变化。其中, 南北向倾斜最大约 0.00014, 东西向倾斜最大约 0.0002。倾斜值处于较低水平, 小于规范<sup>[6]</sup>限值 0.002。

4 帷幕设计影响分析

调整各区段 AqII 层帷幕插入深度, 研究不同帷幕设计对沉降影响。表 3 汇总了考虑的帷幕设计。各方案除了提到的位置, 其余各处帷幕设计与方案 1 一致。

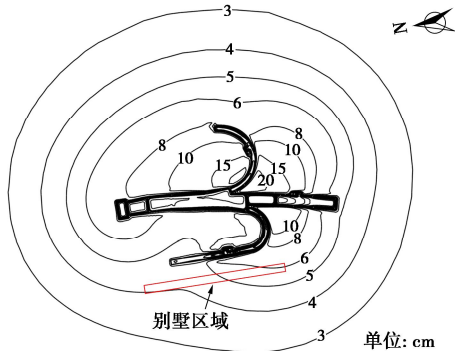


图 5 降承压水 120 d 引起的沉降云图  
Fig. 5 Contours of ground settlement after dewatering of 120 d

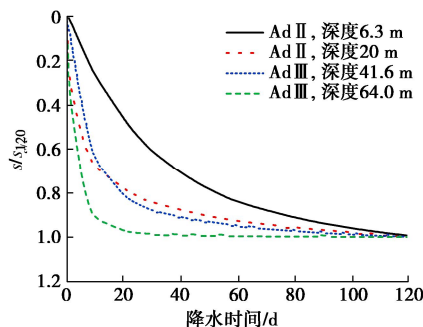


图 6 归一化降深随时间变化曲线  
Fig. 6 Normalized drawdown curves with time

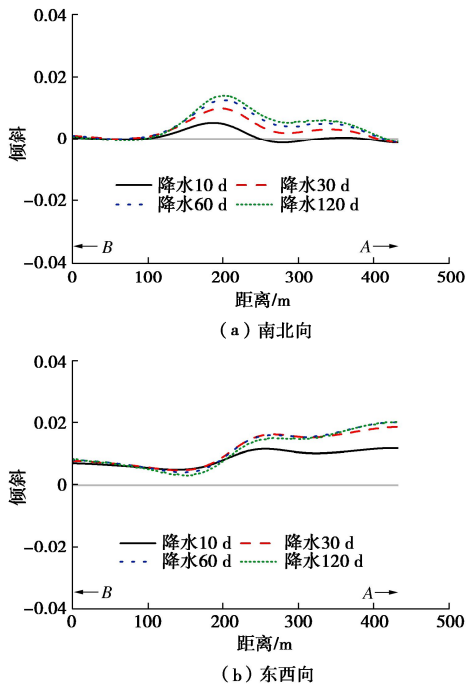


图 7 不同降水时间别墅倾斜  
Fig. 7 Inclines of villas after various dewatering time

图 8 为不同帷幕设计下降水 60 d 别墅区沿 AB 的沉降  $\delta_v$ 。可知, 与初始方案 (方案 2) 相比, 由于变更方案 (方案 1) 在 AK0+146-411 区段隔断了 AqII, 因此别墅区沉降可得到有效控制, 最大  $\delta_v$  由 14.8 cm 降低至 5.4 cm, 降低了 63.5%。基于方案 1, 在 A 匝道处完全隔断 AqII (方案 3) 后, 仅别墅区中部偏南的  $\delta_v$  得到了一定的控制, 这是因为相比方案 1, 方案

3 仅额外在 AK0+411-501 区段隔断 AqII, 而该区段降深需求低, 因此是否将其隔断的影响较小。基于方案 1, 方案 4 在主线隔断 AqII, 别墅区南部  $\delta_v$  得到一定程度的控制, 说明别墅区靠南处  $\delta_v$  在很大程度上由主线降水引起。基于方案 1, 方案 5 在 B 匝道隔断 AqII, 但别墅区  $\delta_v$  与方案 1 几乎无异, 说明在 B 匝道对 AqII 层降水几乎不引起别墅区沉降, 这是由于 B 匝道与别墅区较远, 且在 B 匝道处降水引起的渗流会较大幅度地被两者间的帷幕阻隔。方案 6 在所有区段隔断 AqII, 因此别墅区  $\delta_v$  均得到有效控制, 此时的  $\delta_v$  可认为仅由在 AqIII 中降水引起。

表 3 分析中不同的止水帷幕设计

Table 3 Designs of waterproof curtain in analysis	
方案	止水帷幕设计方案
1	设计变更后的方案 (基础算例)
2	初始设计 (AK0+146-411 区段未将 AqII 隔断)
3	A 匝道将 AqII 完全隔断
4	主线将 AqII 完全隔断
5	B 匝道将 AqII 完全隔断
6	所有区域将 AqII 完全隔断

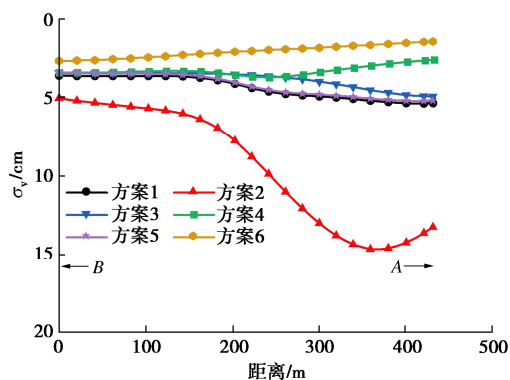


图 8 不同帷幕设计下降水 60 d 别墅地表沉降

Fig. 8  $\delta_v$  of villas for various curtain designs after dewatering of 60 d

综上, A 匝道 AK0+146-411 区段的帷幕设计变更可有效控制别墅区沉降。若要进一步控制沉降, 可继续在主线隔断 AqII, 但在 A 匝道剩余区段 (AK0+411-501) 及 B 匝道隔断 AqII 的效果十分有限。

5 结 论

- (1) 降承压水引起的沉降稳定较慢, 降水 10, 30, 60, 120 d 时, 别墅区最大沉降为 2.5, 4.3, 5.4, 6.1 cm。沉降持续发展是由于弱透水层固结较慢导致。倾斜稳定相对较快, 最大倾斜约 0.0002, 满足规范要求。
- (2) A 匝道止水帷幕设计变更后, 别墅区最大沉降可降低 63.5%。若想进一步通过变更帷幕设计控制变形, 效率最高的方式为在主线降水区段隔断 AqII。在 A 匝道剩余区段及 B 匝道隔断 AqII 的效果十分有限。

参考文献:

[1] 李方明, 陈国兴, 刘雪珠. 悬挂式帷幕地铁深基坑变形特性研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(12): 2182-2190. (LI Fangming, CHEN Guoxing, LIU Xuezhu. Deformation characteristics of suspended curtain deep foundation pit of metro lines[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(12): 2182-2190. (in Chinese))

[2] 王建秀, 郭太平, 吴林高, 等. 深基坑降水中墙-井作用机理及工程应用[J]. 地下空间与工程学报, 2010, 6(3): 564-570. (WANG Jianxiu, GUO Taiping, WU Lingao, et al. Mechanism and application of interaction between underground wall and well in dewatering for deep excavation[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2010, 6(3): 564-570. (in Chinese))

[3] 何绍衡, 夏唐代, 李连祥, 等. 地下水渗流对悬挂式止水帷幕基坑变形影响[J]. 浙江大学学报(工学版), 2019, 53(4): 713-723. (HE Shaoheng, XIA Tangdai, LI Lianxiang, et al. Influence of groundwater seepage on deformation of foundation pits with suspended impervious curtains[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2019, 53(4): 713-723. (in Chinese))

[4] XIE Z F, SHEN S L, ARULRAJAH A, et al. Environmentally sustainable groundwater control during dewatering with barriers: a case study in Shanghai[J]. Underground Space, 2021, 6: 12-23.

[5] 周火垚, 王华钦, 张维泉. 悬挂式止水在基坑工程中的应用[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(增刊 1): 470-473. (ZHOU Huoyao, WANG Huaqin, ZHANG Wei-quan. Application of pensile impervious curtain to excavations[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(S1): 470-473. (in Chinese))

[6] 建筑地基基础设计规范: GB 50007—2011[S]. 北京: 中国计划出版社, 2012. (Code for Design of Building Foundation: GB 50007—2011[S]. Beijing: China Planning Press, 2012. (in Chinese))

[7] 贾 堤, 石 峰, 郑 刚, 等. 深基坑工程数值模拟土体弹性模量取值的探讨[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(增刊 1): 155-158. (JIA Di, SHI Feng, ZHENG Gang, et al. Elastic modulus of soil used in numerical simulation of deep foundation pits[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(S1): 155-158. (in Chinese))

[8] HELWANY S. Applied Soil Mechanics with ABAQUS Applications[M]. New Jersey: John Wiley & Sons Inc, 2007.

(编校: 黄贤沙)