

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.2023.12.063

地铁深基坑非对称帷幕下的承压水控制设计

王俊杰

[上海公路桥梁(集团)有限公司,上海市 200433]

摘 要: 针对上海轨道交通 15 号线某车站基坑条形且超长的特点,在承压水控制设计中充分利用非对称帷幕下的短滤管三维流及基坑分坑的尺度效应进行承压水控制设计,分析非对称帷幕下的渗流规律和不同降水运行方案下的环境影响,综合工期、资源配置和降水预测分析,最终确定相对最合理的运行方案。

关键词: 非对称帷幕;承压水控制;尺度效应;分坑;条形基坑

中图分类号: TU47

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2023)12-0263-04

0 引 言

随着城市地下空间的不断发展,城市地铁基坑的建设受到了多方面的制约,工程环境安全越来越复杂,在软土地区基坑承压水控制技术则越来越重要<sup>[1]</sup>。近年来出现了较多因承压水控制不当引起的基坑事故和环境事故,造成了巨大的经济损失和恶劣的社会效应<sup>[1]</sup>。

基于环境安全的承压水控制设计中,充分利用墙-井作用机理<sup>[2]</sup>和基坑尺度效应<sup>[3]</sup>开展设计越来越受各方重视。

在城市地铁建设中受到早期规划设计的影响,部分围护已与临近工程施工完成,出现了一些单边或 U 型隔断型降水项目给后期工程设计带来了一些不良影响。

上海轨道交通 15 号线某地铁站为地下两层一岛一侧式双柱三跨车站,本站位于大渡河路下,北临同普路,南临云岭东路,沿南北方向设置站位,基坑全长 487 m,相对普通地铁车站,此为超长、条形基坑,基坑开挖深度 18.31~20.20 m,西侧部分地墙已与商业建筑建设期间完成。周边建(构)筑物多,环境复杂,特别是东侧紧邻基坑 15 m 的条形基础的 5~6 层砖混结构居民楼和紧邻基坑 3.3 m 的 DN2460 合流污水管均是需重点保护的对象,同时场地内水文地质条件复杂,需针对第 I 承压水进行管控,是本工程地下水控制的一个关键点。

收稿日期: 2022-10-12  
作者简介: 王俊杰(1990—),男,学士,工程师,从事现场施工管理工作。

1 工程概况

地铁车站基坑端头井和标准段的开挖深度见表 1,地下连续墙深度设计如图 1 至图 3 所示,基坑东侧和端头井部位采用 1 m 厚的地下连续墙,墙深 46.5~48.0 m,进入下部隔水层 2~3 m,将第 I 承压水隔断;基坑西侧标准段采用 0.8 m 厚地下连续墙,古河道区域地墙深 37.5 m,正常土层区域地墙深 34 m,墙趾进入第 I 承压含水层 1~2 m,属于单边敞开型。为降低基坑开挖对施工的影响,整个长条形基坑分为了 5 个小坑。

表 1 各基坑开挖深度汇总表

| 工程部位 | 基坑开挖标高 /m | 基坑开挖标高 /m | 地墙深度 /m                                 |
|------|-----------|-----------|-----------------------------------------|
| 南端头井 | -16.80    | 20.20     | 东侧: 46.5~48.0<br>西侧: 34.0<br>(端头井 46.5) |
| 北端头井 | -16.74    | 20.14     |                                         |
| 标准段  | -14.91    | 18.31     |                                         |

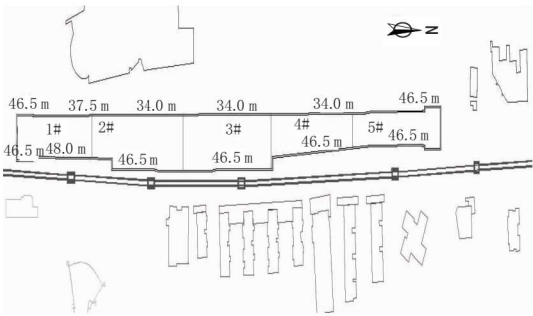


图 1 基坑环境平面图

基坑周边环境复杂,如图 1 所示,东侧紧邻基坑 15 m 的条形基础的 5~6 层砖混结构居民楼和紧邻基坑 3.3 m 的 DN2460 合流污水管都是需重点保护的对象,车站环境保护等级为一级。

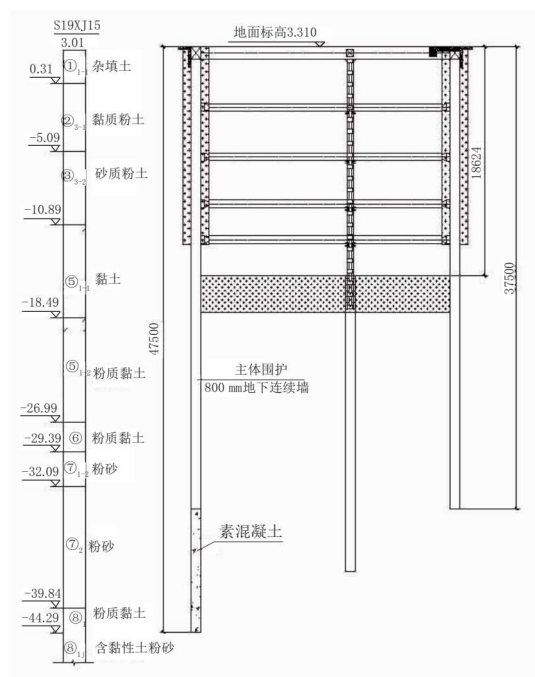


图2 典型剖面图(标准段)(单位:mm)

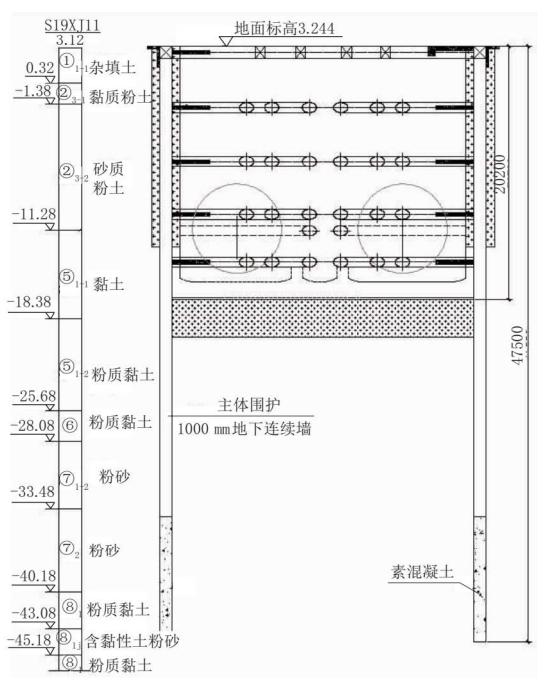


图3 典型剖面图(端头井)(单位:mm)

## 2 水文地质概况

本工程涉及的承压水包括⑤<sub>2</sub>和⑦层,其中⑤<sub>2</sub>层砂质粉土分布于本站点西南角局部,层厚一般为0.8~2.1 m的透镜体且完全被地墙隔断,不作为本次承压水控制的研究对象;⑦层包括了⑦<sub>1-2</sub>灰黄~灰色粉砂层和⑦<sub>2</sub>灰色粉砂层,是上海的第Ⅰ承压含水层,层厚约15 m,勘察期间测量得第Ⅰ承压水的水位埋深为5.28 m(相应标高约-2.04 m)。

根据基坑抗承压水稳定性验算<sup>[4]</sup>,当抗突涌安全系数按1.05考虑时,计算得第Ⅰ承压水的临界开挖标高为-12.39 m,标准段安全水位标高为-6.35 m(降深4.31 m),端头井安全水位标高为-9.60 m(降深7.56 m)。

## 3 承压水控制风险分析

对于本基坑工程的承压水治理主要存在以下风险。

(1)水文地质条件方面:承压含水层厚度较大,约15 m,⑦<sub>1-2</sub>、⑦<sub>2</sub>层渗透性差异较大,且两者间的分界不明显,部分区域还存在渗透性更低的⑦<sub>1-1</sub>草黄色粉质黏土夹黏质粉土层,对于井结构的选择及对坑内外水位降深分析预测精度影响明显。

(2)环境方面:本基坑周边环境极度复杂,且距离基坑边界较近,可选择的保护措施也较少。

(3)其它风险:基坑一侧基本隔断含水层,另一侧基坑少量进入含水层,不能做到完全隔断式降水;考虑到止水帷幕、桩基施工及加固施工风险较大,极易形成水平渗漏点,降水井完成一部分后,需进行抽水试验,以进一步完成承压水的控制。

## 4 承压水控制设计

### 4.1 减压井平剖面设计

针对上述风险,本工程将充分利用非对称帷幕下的短滤管三维流及基坑分坑的尺度效应<sup>[2]</sup>进行承压水控制设计。车站基坑共计降压井22口,每个分口布设2口观测兼备用井(合计10口),坑外东侧布设10口水位观测井,如图4所示。

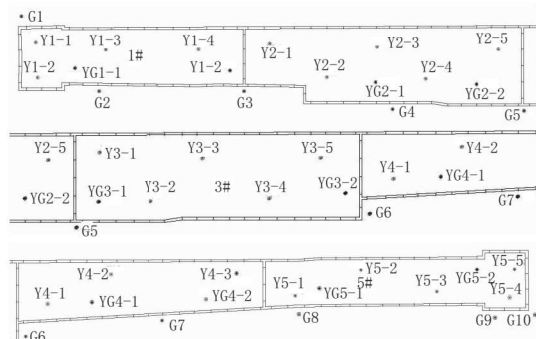


图4 车站主体基坑降压井平面图

本工程区域⑦<sub>1-2</sub>、⑦<sub>2</sub>层渗透性差异较大,且两者间的分界不明显,对于井结构的选择影响较大,同时考虑到围护深度及降压幅度要求,降压井按井深41 m考虑,滤管8 m,观测井按滤管6 m考虑,如图5所示。



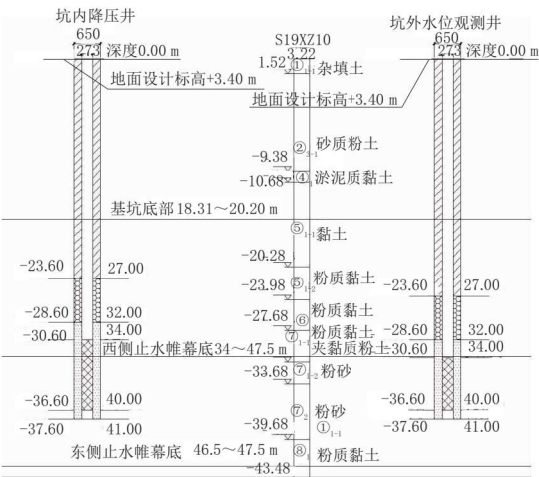


图5 车站主体基坑降压井剖面图(西)

4.2 地下水三维非稳定渗流数值模型的构建

根据场区水文地质条件,利用 Visual Modflow 软件,建立本站的地下水三维非稳定渗流数值模型,模型尺寸为1 200 m×1 200 m,从上到下分为浅部黏性土层、第Ⅰ承压含水层、⑧层弱隔水层等,其对应水文参数见表2,其中含水层中考虑到滤管位置及止水帷幕深度又细分成多层;模型边界定义为定水头边界,水位不变,埋深设定为5 m。平面剖分情况如图6所示。

表2 含水层水文参数取值

| 土层              | 土性        | 水平渗透系数<br>$K_h/(m \cdot d^{-1})$ | 垂直渗透系数<br>$K_v/(m \cdot d^{-1})$ |
|-----------------|-----------|----------------------------------|----------------------------------|
| ①~⑥             | 黏性土       | 2.00E-05                         | 2.00E-06                         |
| ⑦ <sub>12</sub> | 粉质黏土夹黏质粉土 | 0.80                             | 0.08                             |
| ⑦ <sub>2</sub>  | 粉砂        | 2.50                             | 0.40                             |
| ⑧               | 粉质黏土      | 3.00E-04                         | 3.00E-05                         |

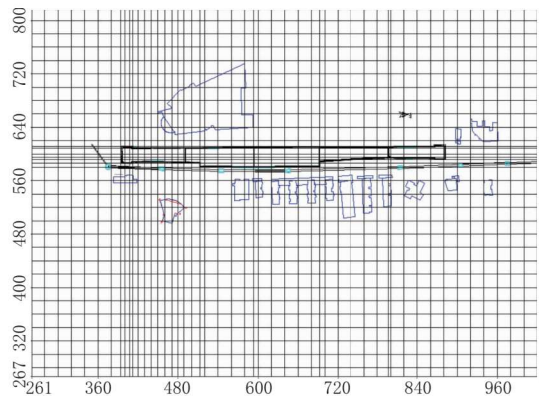


图6 数值模型平面剖分图

4.3 降水运行方案的比选

本工程周边环境复杂,且基坑长度达到了487 m,在地下水控制中通过分隔墙的设置,将基坑分为5

个坑施工,降水运行方案考虑分为以下4种降水运行策略执行。

(1)方案一:1~5#坑同步开挖至底。

(2)方案二:5个基坑错步开挖,实现分坑单独降水,即完成一个坑的承压水降水后,再进行下一个坑的承压水降水。

(3)方案三:2#和4#同步承压水降水,1#、3#和5#同步承压水降水。

(4)方案四:2#和4#同步承压水降水,1#和3#同步承压水降水,5#单独承压水降水。

通过4.2节中地下水三维渗流模型的建立开展了渗流分析,在满足基坑内降深设计要求下,预测采取不同基坑施工方案时基坑外敏感代表点的降深情况,由表3可知,东侧南部的降深主要受到1#的影响较大,东侧北部的降深主要受到5#的影响较大。

表3 基坑多种施工方案降水分析对比表

| 方案 | 步骤       | 水位降深/m |        |        |         |         |
|----|----------|--------|--------|--------|---------|---------|
|    |          | 东侧小区南侧 | 东侧小区南侧 | 东侧小区北侧 | 合流污水管南侧 | 合流污水管北侧 |
| 一  | 1~5#同时开挖 | 0.88   | 0.91   | 1.20   | 1.55    | 2.10    |
|    | 1#       | 0.47   | 0.34   | 0.28   | 1.30    | 0.30    |
|    | 2#       | 0.34   | 0.27   | 0.28   | 0.80    | 0.40    |
|    | 3#       | 0.27   | 0.26   | 0.32   | 0.50    | 0.60    |
|    | 4#       | 0.29   | 0.33   | 0.49   | 0.45    | 0.90    |
| 二  | 5#       | 0.42   | 0.57   | 0.95   | 0.35    | 1.80    |
|    | 2#、4#    | 0.46   | 0.45   | 0.56   | 0.99    | 0.95    |
|    | 1#、3#、5# | 0.83   | 0.86   | 1.20   | 1.40    | 1.80    |
| 三  | 1#、3#    | 0.58   | 0.47   | 0.46   | 1.40    | 0.60    |
|    | 2#、4#    | 0.46   | 0.45   | 0.56   | 0.99    | 0.95    |
|    | 5#       | 0.42   | 0.57   | 0.95   | 0.35    | 1.80    |

综合工期、资源配置和降水分析,最后采用方案三。方案三对应的降水云图如图7和图8所示,根据上述预测结果,开启坑内降压井,东侧围护隔断承压层,坑外承压水位大部分区域小于1.0 m,西侧水位降深约为4.3~5.3 m。

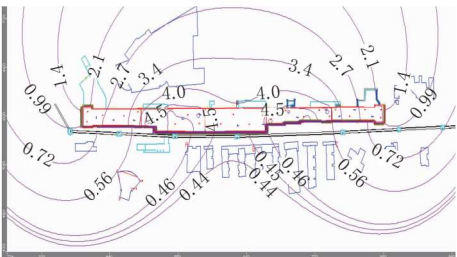


图7 方案三2#+4#基坑降压降水后,第Ⅰ承压水水位降深等值线图(单位:m)

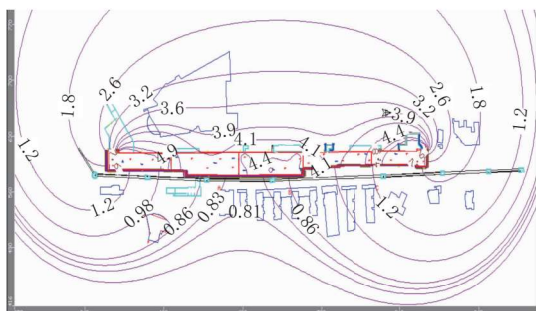


图8 方案三1#+3#+5# 基坑降压降水后,第I承压水水位降深等值线图(单位:m)

#### 4.4 非对称帷幕的渗流分析

本工程车站基坑止水帷幕差异巨大,东侧隔断,西侧标准段基本为敞开型,标准段剖面减压降水期间的渗流分析如图9所示,由图9可知西侧敞开区坑内外降深基本无差异,在帷幕隔断处,帷幕的阻隔作用明显,坑外降深明显降低,其水位降深主要受到下部隔水层和平面西侧降水大漏斗的影响。为端头井剖面减压降水期间的渗流分析如图10所示,由图10可知虽然端头井地墙隔断了含水层,但因存在隔水缺口,坑外水位降深仍较为明显,其水位降深主要受平面西侧降水大漏斗的影响。

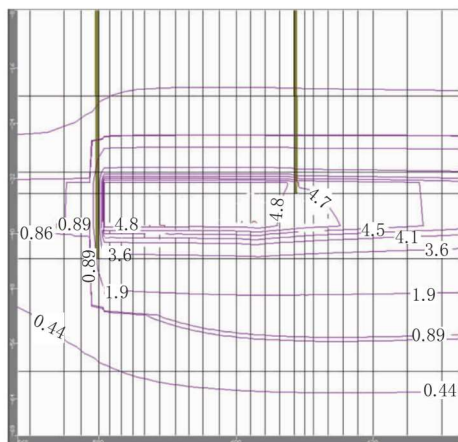


图9 标准段第I承压水水位降深剖面等值线图(单位:m)

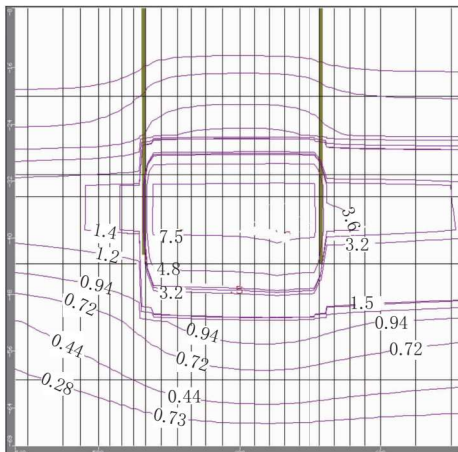


图10 端头井第I承压水水位降深剖面等值线图(单位:m)

#### 4.5 承压水试抽水试验

减压井完成后开展试抽水试验,试验主要目的是为了在基坑开挖前确认降水方案的可行性,确定降压运行工况,通过水位恢复速率分析双电能源的配置。

以4# 基坑为例,采用坑内3口降压井作为抽水井,群井抽水历时24 h,单井流量约为 $10 \text{ m}^3/\text{h}$ ,基坑涌水量为 $30 \text{ m}^3/\text{h}$ ,试验期间采用坑内2口、坑外2口为试验观测井,坑内观测井水位随时间的变化趋势如图11所示,坑内观测井稳定水位埋深为11.22~12.37 m,满足基坑最大设计安全水位要求。坑外观测井(位于基坑东侧,其地墙已隔断承压含水层)水位无明显下降。

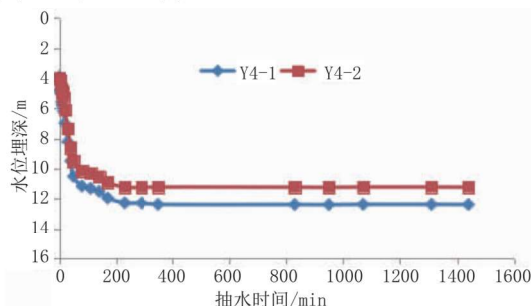


图11 群井抽水试验期间,观测井水位埋深~历时曲线

群井停抽后,坑内观测井水位恢复较快,10分钟水位恢复比率约3.84%~4.93%;30分钟水位恢复比率约20.50%~22.13%;90分钟水位恢复比率约53.46%~58.67%,恢复24 h后水位基本恢复至初始值。

#### 5 结论与建议

针对上海轨道交通15号线某车站条形且超长的特点,在承压水控制设计中充分利用了非对称帷幕下的短滤管三维流及基坑分坑的尺度效应进行承压水控制设计,分析了非对称帷幕下的渗流规律和不同降水运行方案下的环境影响,综合工期、资源配置和降水预测分析,确定了相对最合理的运行方案,最后通过承压水试抽水试验,检验了降水的可行性,分析了降水运行水位恢复速率风险。

本工程充分利用车站基坑长度长的特点,在全部地墙施工完毕后实施分坑降水策略,达到了预期控制目标。对于类似条形基坑,应重视止水帷幕的先期完成工作,否则无法充分利用止水帷幕的止水作用。

#### 参考文献:

[1] 吴林高,朱雁飞,姜荣祥,等.深基坑工程承压水危害综合治理技术

(下转第272页)



性的影响的有限元模拟研究,通过分析不同浅基础埋深和桩基础长度对边坡稳定性的影响,提出了考虑坡顶建筑结构的垂直高边坡支护方案,得出以下主要结论:

(1)浅基础埋深对边坡滑裂面影响较小,桩基础长度会改变分布,桩长越长,滑裂面越深。

(2)一般情况下,坡顶建筑会降低边坡安全系数,当采用浅基础时,基础埋深越大安全系数越高,当采用桩基础时,随着桩长的增加,边坡安全系数升高,当桩长增加到支护桩深度,边坡稳定性大于原始边坡。

(3)边坡坡顶位移随着浅基础埋深的增加和桩基础长度的增加略有减小。

(4)支护桩身受力随着浅基础埋深增大而减小,而对于桩基础,当桩长增加到一定程度,不再影响支护桩的受力。

综上所述,出于安全考虑,当垂直支护的边坡坡顶有近坡建筑时,可以考虑结合建筑结构的边坡支护方案,建筑基础优先考虑桩基础,当采用浅基础时要适当增加浅基础埋深。

#### 参考文献:

- [1] GB 50007—2011,建筑地基基础设计规范[S].
- [2] 邹广电,魏汝龙.土坡稳定分析普遍极限平衡法数值解的理论及方法研究[J].岩石力学与工程学报,2006,25(2):363-363.
- [3] Fellenius W. Calculation of the stability of earth dams [C]// Proc. of the Second Congress on Large Dams.1936.
- [4] 何思明,张晓曦,罗渝.坡顶条形荷载作用边坡潜在滑裂面与稳定性分析[J].山地学报,2011,29(1):95-100.
- [5] 罗智.坡顶荷载对边坡稳定性影响研究[J].公路交通科技:应用技术版,2014(7):33-37.
- [6] 李运军,孙艳杰,赵治海.改进 Fellenius 法对坡顶荷载下的边坡稳定性评价[J].西安科技大学学报,2018,38(5):767-775.
- [7] Kumar J, Kumar N. Seismic bearing capacity of rough footings on slopes using limit equilibrium[J].G é otechnique,2003,53(3):363-369.
- [8] Choudhury D, Rao K S S . Seismic bearing capacity of shallow strip footings[J].Geotechnical & Geological Engineering,2005,23(4):403-418.
- [9] Halder K, Chakraborty D, Dash S K . Bearing capacity of a strip footing situated on soil slope using a non-associated flow rule in lower bound limit analysis [J]. International Journal of Geotechnical Engineering,2017,13(3):1-9.
- [10] 文继东.考虑坡顶建筑荷载影响的边坡稳定性及加固设计优化研究[D].昆明理工大学,2017.
- [11] 杨龙华.建筑荷载对边坡稳定性的影响研究[D].中国地质大学(北京),2021.
- [12] 陈欣.山区建筑桩基与边坡相互作用研究[D].重庆大学,2016.
- [13] 黄嘉,于德顺,卢黎等.坡顶建筑桩长对岩坡稳定性影响的数值分析[J].建筑结构,2017,47(19):53-58.
- [14] 魏小楠,吴维义,杨根兰.考虑坡顶建筑荷载影响下的公路边坡稳定性分析[J].交通科技,2018(5):1-5.
- [15] Kalourazi A F, Izadi A, Chenari R J . Seismic bearing capacity of shallow strip foundations in the vicinity of slopes using the lower bound finite element method[J]. Soils and Foundations,2019,59(6):1891-1905.
- [16] GB 50330—2013,建筑边坡工程技术规范[S].
- [1] 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.
- [2] DG/TJ 08-61—2018,基坑工程技术标准[S].

(上接第 266 页)

[M].北京:人民交通出版社,2016.

- [2] 陆建生.悬挂式帷幕基坑地下水控制中的尺度效应[J].工程勘察,2015,43(1):51-58.