

DOI: 10.11779/CJGE201812004

悬挂式帷幕地铁深基坑变形特性研究

李方明^{1,2}, 陈国兴², 刘雪珠³

(1. 中国地震局工程力学研究所, 黑龙江 哈尔滨 150080; 2. 南京工业大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210009;
3. 江苏省岩土工程公司, 江苏 南京 210018)

摘要: 基于江漫滩地铁深基坑的变形实测资料, 采用理论分析、经验公式和有限元数值模拟方法, 总结了悬挂式帷幕基坑变形规律, 给类似工程设计和监测提供依据。结果表明: 悬挂式帷幕基坑地表沉降曲线呈凹槽形, 地表沉降考虑流固耦合作用大于不考虑流固耦合作用; 地下连续墙的最终形态为内凸胀肚型, 墙顶水平位移不完全是朝坑内移动, 地下连续墙最大水平位移与基坑挖深的比值和全止水帷幕基坑差异不大, 最大水平位移点深度位于坑底附近; 由降水引起的地表沉降占总沉降量的比值约为 0.54; 地表沉降范围可以划分为主要影响区、次要影响区和微弱影响区; 地表沉降曲线可根据影响分区选用不同的函数表达式; 最大地表沉降点位置大于同等条件下全止水帷幕基坑约 1.0~3.0 m。
关键词: 悬挂式止水帷幕; 地铁; 江漫滩; 基坑; 降水; 地表沉降

中图分类号: TU47; U45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 4548(2018)12 - 2182 - 09

作者简介: 李方明 (1975 -), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事地下工程防灾减灾、地下空间的开发利用、桥梁隧道与古建筑结构检测和加固工作。E-mail: 184323102@qq.com。

Deformation characteristics of suspended curtain deep foundation pit of metro lines

LI Fang-ming^{1,2}, CHEN Guo-xing², LIU Xue-zhu³

(1. Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China; 2. Institute of Geotechnical Engineering, Nanjing Tech. University, Nanjing 210009, China; 3. Geotechnical Engineering Company of Jiangsu Province, Nanjing 210018, China)

Abstract: Based on the actual deformation data of suspended curtain deep foundation pit of metro lines in flood plain areas, the deformation laws of the deep foundation pit are analyzed to provide a reference to the design and monitoring of similar projects by using the methods of theoretical analysis, empirical formulas and finite element numerical simulation. The results show that the distribution curve of the ground subsidence behind the suspended curtain takes a shape of groove. The ground subsidence considering fluid-structure interaction is greater than that without considering fluid-structure interaction. The final shape of the underground diaphragm wall is convex. The horizontal displacement of the wall at the top does not completely move to the pit. The ratio of the maximum horizontal displacement of the diaphragm wall to the excavation depth of the foundation pit is similar to the situation of the foundation pit with wholly used waterproof curtain. The depth of the maximum horizontal displacement point is near the bottom of the foundation pit. The ratio of the ground subsidence caused by precipitation to the total subsidence is about 0.54. The range of ground subsidence can be divided into strong, moderate and weak influence areas. The curve of ground subsidence in each influence area can thus use different functional expressions. The location of the maximum ground subsidence point is farther than that of the foundation pit with wholly used waterproof curtain about 1.0~3.0 m under the same conditions.

Key words: suspended impervious curtain; metro; floodplain; foundation pit; precipitation; ground subsidence

0 引言

南京地处长江中下游, 是长三角经济圈的重要组成部分, 国家级江北新区和长三角特大城市的定位, 南京由跨江时代进入拥江时代发展, 大量地铁线路不可避免的位于长江漫滩区域。南京有近 1/4 的地域位于长江漫滩区, 已建成或规划的地铁站点多达 100 个

位于长江漫滩区 (图 1)。南京长江漫滩第四纪地层厚度约为 45.0~65.0 m, 上部以细粒沉积物软黏土为主, 下部粗粒河床沉积物砂、砾石为主。上部软黏土常夹

基金项目: 江苏省地质矿产勘查局基金项目 (2015-KY-11)

收稿日期: 2017 - 09 - 25

有粉细砂层透镜体, 层厚约 4.0~35.0 m, 中下部砂砾层厚约为 3.0~40.0 m, 多为承压含水层。软黏土强度低、压缩性高、孔隙比大、含水率高、多为软流塑状态; 砂砾层渗透系数大、透水性强, 地下水丰富, 工程特性差。由于砂砾含水层厚度较大, 地铁车站深基坑支护结构设计时, 考虑到施工复杂程度及经济性, 大量的采用悬挂式止水帷幕。悬挂式止水帷幕是指止水帷幕并没有穿透整个含水层进入相对不透水层, 而是进入含水层一定深度, 结合坑内降水, 形成内降外止的地下水处理方式(图 2)。当坑内进行降水时, 含水层的天然水力联系在水平方向受到阻碍, 基坑内外含水层上部不连续, 坑外地下水需绕流到止水帷幕墙底进入坑内, 止水帷幕加大了坑外地下水渗流路径, 减小了坑外地下水头的损失, 从而减小对周边环境的影响。但从以往的工程实测资料来看, 虽然悬挂式止水帷幕坑外水头损失要小于开放式大降水引起的水头损失, 但降水引起的基坑周边土体沉降也不容忽视, 其造成的变形影响远大于全止水帷幕基坑。

关系上^[12-15]。本文以 10 个长江漫滩地铁深基坑变形实测资料为基础, 采用理论分析、经验公式和有限元数值模拟方法, 总结了悬挂式止水帷幕基坑流固耦合作用引起的围护结构和周边地表变形特点和规律, 对掌控围护结构及周边环境的安全状态、合理控制基坑和周边环境的变形等具有重大的意义, 为今后本地区类似工程的设计、施工和监测提供经验依据。

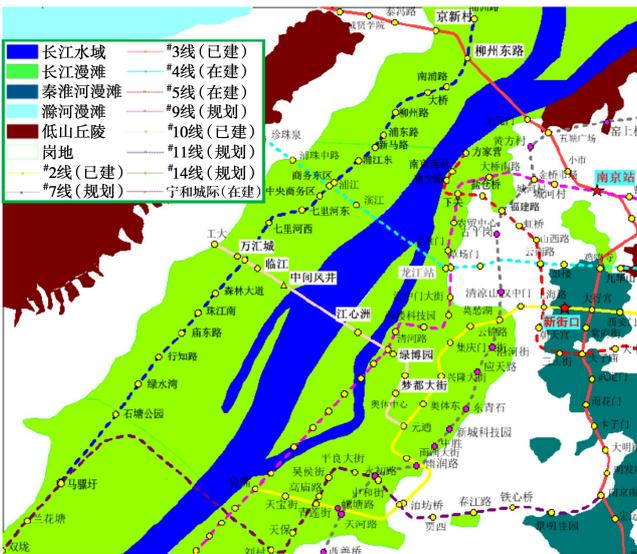


图 1 南京江漫滩区域及地铁线路分布图

Fig. 1 Yangtze River floodplain area and metro line distribution map of Nanjing

对于地下工程领域而言, 由于不同地区地层差异较大, 基于当地大量实测数据的统计分析经验方法仍是目前指导地下工程设计较为可靠的方法。许多学者^[1-11]均采用经验方法对基坑施工引起的变形进行了研究, 但这些研究成果大都针对全止水帷幕基坑, 尚未出现针对长江漫滩特殊地质条件下悬挂式止水帷幕基坑开挖与降水流固耦合作用引起基坑变形统计规律的研究成果, 以往的研究成果主要集中在单个基坑工程的悬挂式止水帷幕插入深度与坑外降水深度及地表沉降的

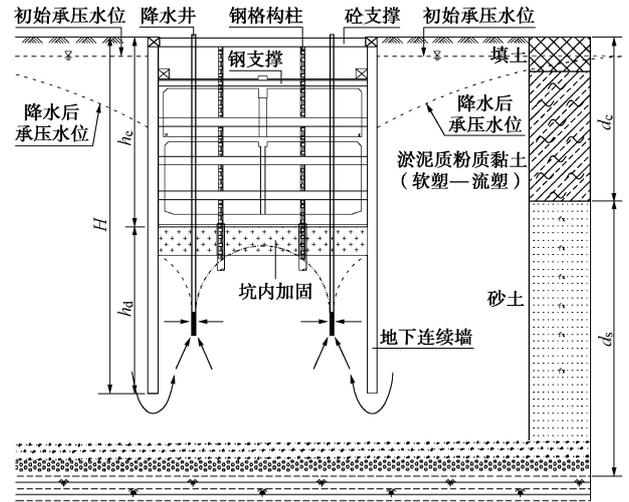


图 2 典型基坑支护剖面图

Fig. 2 Profile of typical support of foundation pit

1 工程概况

南京长江漫滩区域地铁车站标准段基坑开挖深度为 15.5~23.0 m, 宽度约 22.0 m, 均采用地下连续墙加内支撑的围护方式, 地下连续墙作为挡土和止水结构, 厚度为 800 mm 和 1000 mm, 墙体混凝土强度等级为 C35, 采用 H 型钢接头。首道支撑均采用强度、刚度和稳定性较好的钢筋混凝土支撑, 其余各道支撑和倒撑采用方便施工的 $\Phi 609 \text{ mm} \times 16$ 钢管支撑。坑底采用裙边加抽条的水泥土加固方式, 加固深度 3.0 m, 坑内管井降水, 明挖顺作法施工。10 个地铁车站基坑平面分布见图 1, 万汇城和龙江站 2 个为全止水帷幕, 工大站基坑地下连续墙虽然插入不透水层, 但要降低承压水头, 典型的悬挂式帷幕基坑支护剖见图 2。基坑的开挖深度、地下连续墙深度、支撑道数、工程地质情况见图 3。从图上可以看出, 基坑开挖深度为 16.0~23.0 m, 地下连续墙深度为 29.5~47.0 m, 悬挂式帷幕基坑地下连续墙插入比 $h_d/h_e=0.87\sim 1.35$, 平均值 1.05, 全止水帷幕基坑插入比 $h_d/h_e=0.88\sim 0.90$, 平均值 0.89, 悬挂式帷幕基坑地下连续墙插入比略大于全止水帷幕基坑, 主要原因是为了最大限度的减少降水的影响。

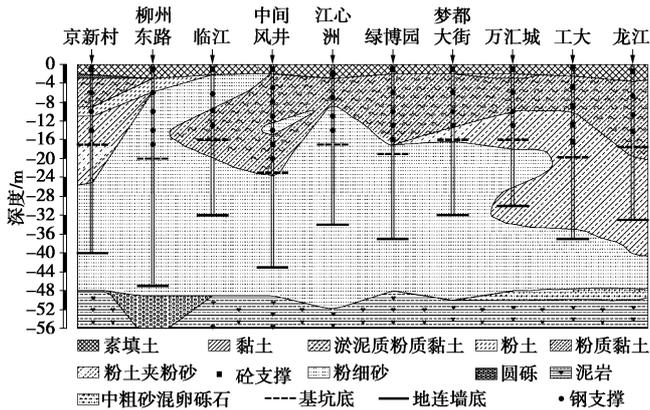


图3 工程地质剖面图

Fig. 3 Engineering geological profile

2 有限元数值模型建模

地铁站深基坑均为狭长型，采用 ABAQUS 二维平面有限元模型分析计算。因为降水影响范围远大于基坑开挖施工影响范围，所以模型计算宽度主要取决于降水影响范围，计算深度取至基岩，无论是开挖还是降水对变形影响甚微。

把基坑假设为一个大的非完整井，当坑内降水时，坑内水位下降较快，地下连续墙外侧地下水将沿垂直向绕流，地下连续墙处内外水位落差最大，远离基坑的区域水位降落不明显，从而形成一个以基坑地下连续墙外壁为中心的降落漏斗。因漫滩区大多数为降低承压含水层水头，其降水影响半径采用经验式估算^[16]：

$$R = 10s_w \sqrt{k} \quad (1)$$

式中 R 为降水影响半径(m)； s_w 为井水位降深(m)； k 为降水井影响范围内含水层的渗透系数加权平均值(m/d)。把基坑假设成大井，江漫滩悬挂式帷幕基坑外侧地下水位降深小于 10.0 m，已满足承压水头降深要求。以中间风井为例，降水影响范围内含水层的渗透系数加权平均值约为 1.9 m/d，经计算降水影响半径为 $R=137.8$ m。

综上所述，以中间风井为例，模型计算深度取 60.0 m，即从地表面算起至 K_{2p-3} 泥岩层，计算深度约为开挖深度 3 倍。模型计算宽度取基坑外 140.0 m，约为开挖深度的 7 倍。模型边界两边为法向约束，底面全约束（法向、切向约束）。模型边界两边地下水位位于地表以下 0.5 m，水位恒定，底面边界为不透水边界。坑内设管井，每次降水完毕，坑内最高水位线位于开挖面下 1.0 m，水位线处孔压为零。地下连续墙与土的接触面采用面与面接触的指令 contact Pair 进行分析，接触面无厚度，小滑移，采用 Mohr-Coulumb 摩擦模型，摩擦系数为 0.3，应用罚函数运算法则。

有限元计算模型黏性土采用硬化的修正剑桥模型 (MCC) 本构关系，砂性土采用莫尔库仑模型 (MC) 本构关系。土体参数的选取依据勘察报告提供的实测值、经验公式推导值和根据实测资料反演得到的土层特性参数。修正剑桥模型中， λ 为压缩曲线的斜率， κ 为回弹曲线的斜率。 M 为通过平均主应力 p 和等效偏应力 t 应力平面上原点的临界状态线的斜率。 λ 根据经验式 (2) 由塑性指数 I_p 确定， M 根据经验式 (3) 由内摩擦角 φ 确定^[17]， κ 根据参数反演推算取值为 $\lambda/10$ ^[18]。中间风井基坑各土层参数见表 1。

$$\lambda = 0.0165I_p - 0.1309 \quad (2)$$

$$M = 6 \sin \varphi / (3 - \sin \varphi) \quad (3)$$

表 1 土层物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of soils

| 层号 | 本构模型 | 层厚 /m | γ /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$) | c /kPa | φ /($^\circ$) | E_s /MPa | M |
|---------------------|------|-------|---|----------|-------------------------|------------|------|
| ① ₋₂ | MCC | 1.0 | 18.6 | 22 | 10.8 | 2.34 | 0.40 |
| ① _{-1a2-3} | MCC | 1.0 | 18.5 | 18 | 17.5 | 3.50 | 0.67 |
| ① _{-2b4} | MCC | 11.0 | 16.7 | 11 | 11.6 | 3.46 | 0.43 |
| ② _{-2d3-4} | MC | 2.0 | 19.4 | 9 | 30.0 | 9.38 | |
| ② _{-2b4} | MCC | 8.0 | 16.7 | 11 | 11.6 | 3.46 | 0.43 |
| ② _{-4d1-2} | MC | 10.0 | 19.4 | 7 | 32.0 | 14.7 | |
| ② _{-5d1} | MC | 8.0 | 19.4 | 6 | 30.0 | 15.6 | |
| ④ _{-4d1} | MC | 13 | 19.8 | 5 | 31.5 | 20.0 | |
| K_{2p-3} | MC | 6.0 | 19.0 | 30 | 30.0 | 20.0 | |

土体采用平面四节点渗流应力耦合单元 CPE4P，钢筋混凝土支撑、钢管支撑和地下连续墙均采用无厚度梁单元 B21 模拟。地下连续墙和钢筋混凝土支撑材料的弹性模量 $E_c=3 \times 10^4$ MPa，钢管支撑弹性模量为 $E_t=2 \times 10^5$ MPa，泊松比 $\mu=0.2$ ，均为线弹性材料。

根据基坑开挖和降水的实际施工工况，采用以下 3 个分析步模拟整个施工过程。①首先是初始地应力平衡过程，此步中除掉原始土体之外的所有单元以及相应接触；②第二步为激活地下连续墙结构单元与土体接触关系，第一次降水，开挖第一层土，并施加第一道钢筋混凝土支撑；③第三步为第二次降水，第二次开挖土体，施加第二道钢管支撑；下一步为继续降水，开挖下层土体，施加下层钢管支撑，直至土层开挖至坑底。

3 基坑变形特性分析

3.1 数值模拟计算值与实测值对比

目前地铁深基坑支护结构设计常用的计算软件有北京理正和上海同济启明星，但二者都有局限性，仅能计算基坑开挖引起的变形，不能同时考虑开挖和降

水流固耦合作用, 其计算结果偏安全。实际上, 基坑降水开挖是一个应力场与渗流场共同作用的过程, 涉及到土体平衡、孔隙水渗流以及二者的相互作用, ABAQUS 有限元软件的渗流应力耦合模块可以基于土体总孔压变化, 采用有效应力法进行流固耦合分析。图 4 为各软件计算的地表沉降与地表实测沉降曲线对比图。从图上可以看出, 基坑周边地表沉降曲线形态均为凹槽型, ABAQUS 有限元计算的悬挂式止水帷幕基坑地表沉降曲线与实测曲线较为吻合, 计算值略小于实测值, 二者都远大于全止水帷幕时(不考虑降水影响)的地表沉降计算值。北京理正和上海同济启明星软件计算沉降曲线形态是闭合的, 其与 ABAQUS 全止水帷幕地表沉降曲线较为吻合。由此可见, 考虑流固耦合作用的坑外地表沉降远大于不考虑流固耦合作用的地表沉降, 沉降最大处前者约为后者的 2.3 倍, 主要原因是降水除了使坑外土体有效应力增加外, 坑内外水头差的存在将使得主动区土中存在着向下的渗透力, 土体加密, 导致地表沉降大于不考虑流固耦合作用的情况。

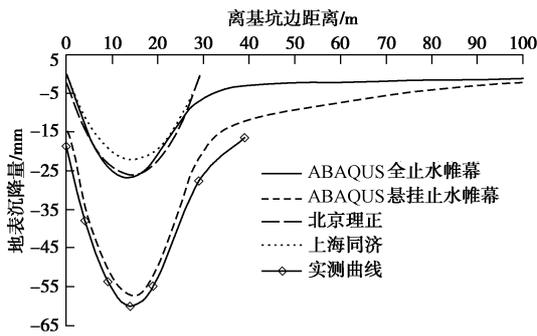


图 4 中间风井基坑地表沉降对比曲线图

Fig. 4 Comparison of ground subsidence of middle airshaft foundation pit

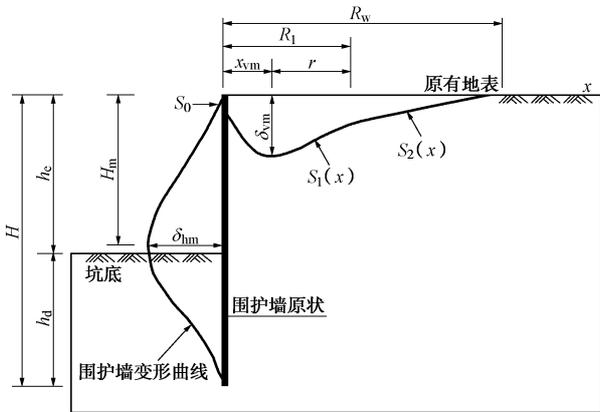


图 5 悬挂式帷幕基坑开挖变形示意图

Fig. 5 Sketch map of excavation deformation of suspended curtain foundation pit

地表沉降曲线成凹槽型的主要原因是由于漫滩区地下连续墙有较大的嵌固深度, 墙趾位于刚度较大的

砂土层内, 地下连续墙发生类似于梁的变形, 最大水平位移一般位于基坑坑底附近, 而受地下连续墙侧壁摩擦阻力的影响, 使得地下连续墙顶端与地表交界处的地表沉降不大, 因而由地下连续墙围护结构变形和降水引起的土体位移的最大地表沉降发生于距围护墙后一定距离处, 从而形成凹槽形沉降形态(图 5)。

3.2 地下连续墙水平位移

图 6 为地下连续墙水平位移实测曲线, 从图上可以看出, 悬挂式帷幕基坑和全止水帷幕基坑地下连续墙侧移区别不大, 所有墙体结构的最终形态为内凸胀肚型, 墙顶水平位移不完全都朝基坑内侧移动, 有的甚至往坑外移动, 即第一道支撑有可能受拉, 因此, 在漫滩区地铁车站基坑第一道支撑都要设计为刚度、强度、稳定性较好且能承受一定拉力的钢筋混凝土支撑。地下连续墙体最终形态为内凸胀肚型的主要原因是: 当开挖初期产生的墙体变形和墙后地表沉降均不大, 后续开挖时一般是先支撑后开挖, 支撑的作用使得支撑处墙体的变形增加不大, 特别是首道支撑通常采用高强度的现浇钢筋混凝土支撑, 而开挖面处的墙体变形增加较大, 即墙体发生较大的深层水平变形, 从而形成如图 5 所示的内凸式变形。

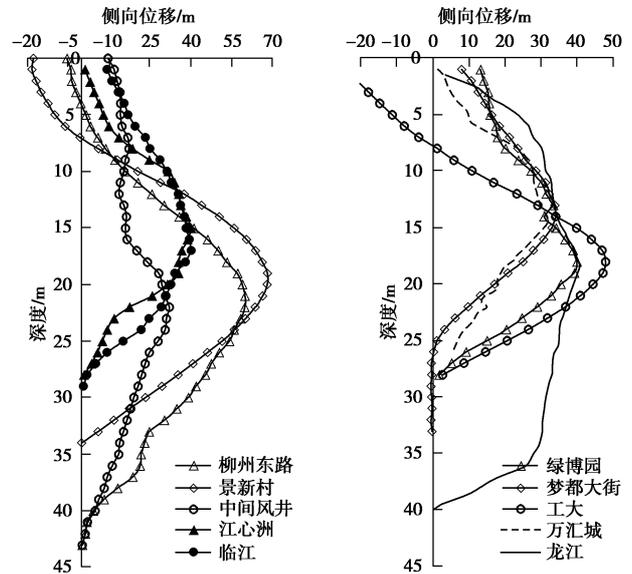


图 6 地下连续墙侧移实测曲线

Fig. 6 Curves of measured side shift of diaphragm walls

从图 7 上可以看出, 长江漫滩深基坑地下连续墙围护结构最大水平位移 δ_{hm} 变化范围(0.14%~0.40%) h_c , 悬挂式帷幕基坑 δ_{hm} 平均值 0.24% h_c , 全止水帷幕基坑 δ_{hm} 平均值 0.23% h_c , 二者 δ_{hm} 差异不大, 在 Tan 等^[19-20]统计的上海地区地下连续墙围护结构 δ_{hm} =(0.02%~0.50%) h_c 范围之内。由此说明坑内降水对墙体的水平变形影响不大, 即地下连续墙外侧承受的水土压力变化不大。

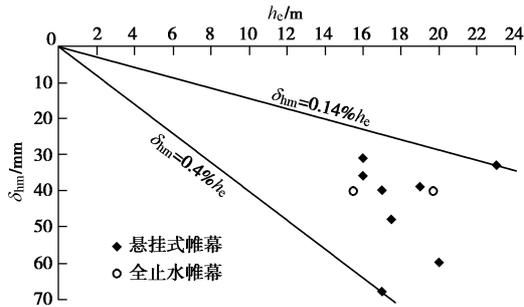


图7 地下连续墙最大水平位移 δ_{hm} 与基坑挖深 h_e 关系

Fig. 7 Relationship between maximum horizontal displacement of diaphragm walls and excavation depth of foundation pit

从图8可以看出, 地下连续墙最大水平位移点深度在 (h_e-3, h_e+3) 区间之间, 大都位于 $H_m=h_e$ 附近, 即位于坑底附近, 在 Tan 等^[19]统计的上海地区地下连续墙围护结构 $H_m=(h_e-7, h_e+7)$ 范围之内。全止水帷幕基坑地下连续墙最大水平位移点深度 H_m 均小于基坑挖深 h_e , H_m 平均值为 $0.98h_e$, 悬挂式止水帷幕基坑地下连续墙最大水平位移点深度 H_m 平均值为 $0.99h_e$, 平均值二者差异不大, 都略小于基坑挖深 h_e 。

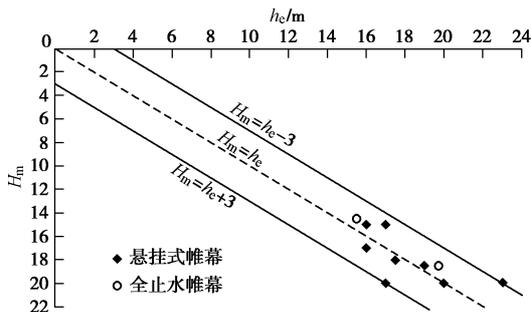


图8 地下连续墙最大水平位移点深度 H_m 与基坑挖深 h_e 关系

Fig. 8 Relationship between depth of maximum horizontal displacement point of diaphragm walls and excavation depth of foundation pit

3.3 地表沉降大小

从图9可以看出, 长江漫滩悬挂式帷幕基坑最大地表沉降 δ_{vm} 变化范围为 $(0.26\% \sim 0.48\%) h_e$, 悬挂式帷幕基坑最大地表沉降远大于全止水帷幕基坑最大地表沉降。悬挂式止水帷幕基坑最大地表沉降平均值为 $0.39\% h_e$, 全止水帷幕基坑最大地表沉降平均值为 $0.18\% h_e$, 悬挂式帷幕基坑最大地表沉降平均值为全止水帷幕基坑最大地表沉降均值的2倍多。WANG 等^[21]统计的上海地区采用地下连续墙围护结构的基坑 δ_{vm} 的变化范围为 $(0.10\% \sim 0.80\%) h_e$, 图9的10个基坑均位于其统计范围之内; Tan 等^[19]统计的上海地区采用地下连续墙围护顺作法地铁站基坑 δ_{vm} 的变化范围分别为 $(0.03\% \sim 0.20\%) h_e$, 远小于图9中悬挂式止水帷幕基坑墙后最大地表沉降, 主要原因可能是其统计的均为全止水帷幕基坑。

从图10可以看出, 长江漫滩区地铁基坑 δ_{vm}/δ_{hm}

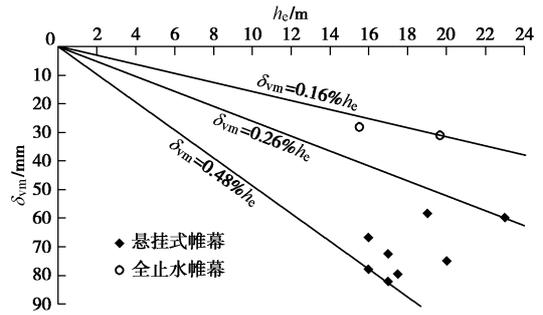


图9 地表最大沉降 δ_{vm} 与基坑挖深 h_e 关系

Fig. 9 Relationship between maximum ground subsidence and excavation depth of foundation pit

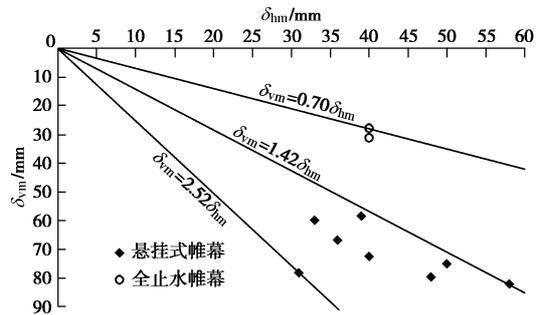


图10 地表最大沉降 δ_{vm} 与地下连续墙最大水平位移 δ_{hm} 关系

Fig. 10 Relationship between maximum ground subsidence and maximum horizontal displacement of diaphragm walls

比值为 $0.70 \sim 2.52$, 上限大于 Tan 等^[19]统计的上海地区地下连续墙地铁车站深基坑 δ_{vm}/δ_{hm} 统计值变化范围 $0.1 \sim 2.0$, 悬挂式帷幕基坑 δ_{vm}/δ_{hm} 远大于全止水帷幕基坑 δ_{vm}/δ_{hm} 的主要原因是地表沉降不仅由地下连续墙侧向变形土体损失引起, 降水也是引起地表沉降的一个主要因素。全止水帷幕基坑 δ_{vm}/δ_{hm} 比值范围为 $0.70 \sim 0.78$, 平均值为 0.74 , 悬挂式止水帷幕基坑 δ_{vm}/δ_{hm} 比值范围为 $1.42 \sim 2.52$, 平均值 1.76 , 因此当知道全止水帷幕基坑地下连续墙最大水平位移 δ_{hm} 时, 墙后最大地表沉降 δ_{vm} 可通过 $0.74\delta_{hm}$ 来预估, 地表沉降主要是基坑土体开挖应力释放导致。悬挂式止水帷幕基坑墙后地表沉降主要由基坑土方开挖和降水二者耦合作用引起, 基坑土方开挖引起的那部分地表沉降 δ_{vm}^s 可借鉴全止水帷幕基坑 δ_{vm}/δ_{hm} 的均值来估算, 然后根据总的沉降量推算出由降水引起的那部分地表沉降 δ_{vm}^w 。经推算悬挂式止水帷幕基坑墙后最大地表沉降 δ_{vm} 仅由降水引起的地表沉降 δ_{vm}^w 所占比例 $0.48 \sim 0.69$, 平均值为 0.54 。由此可见长江漫滩悬挂式帷幕基坑坑内降水引起的地表沉降量可占总沉降量的一半以上, 降水引起的地表沉降不可忽视。

3.4 地表沉降量最大点位置

采用 ABAQUS 有限元依据实测的地表沉降模拟计算出悬挂式止水帷幕基坑整个地表沉降曲线, 同时计算出同等条件下采用全止水帷幕时, 即忽略降水影

响时的地表沉降曲线, 将各基坑采用全止水帷幕和悬挂式止水帷幕最大地表沉降发生点位置 (与地下连续墙的水平距离) x_{vm} 与基坑开挖深度 h_e 的关系见图 11。从图可以看出, 全止水帷幕深基坑最大地表沉降点位置 $x_{vm}=(0.53\sim 0.65)h_e$, 位于地下连续墙后 9.0~13.0 m 之间, 悬挂式止水帷幕 $x_{vm}=(0.65\sim 0.76)h_e$, 位于地下连续墙后 12.0~15.0 m 之间。由此可见, 悬挂式帷幕基坑最大地表沉降点位置 x_{vm} 要比同等条件下全止水帷幕基坑 x_{vm} 大 1.0~3.0 m。最大地表沉降点位置的变大主要是由于基坑土方开挖和降水二者耦合作用的结果。当已知用 abqus 模拟计算的开挖降水耦合地表沉降和仅开挖引起的地表沉降, 那么二者之差即为仅降水引起的沉降。从图 12 中间风井由 ABAQUS 模拟计算的地表沉降与开挖和降水关系曲线图上可以看出, 由于受地下连续墙侧壁摩阻力的影响, 仅由降水引起的地表沉降并不与水位线一致, 最大地表沉降点位置要远远大于仅由土方开挖引起的最大地表沉降点位置。

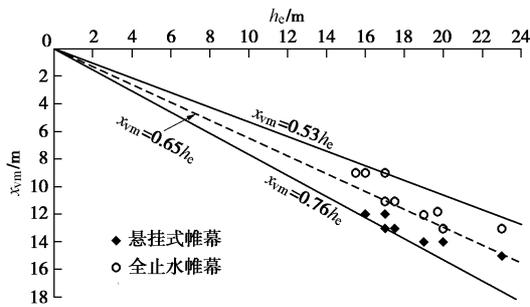


图 11 最大地表沉降点位置 x_{vm} 与基坑挖深 h_e 关系

Fig. 11 Relationship between location of maximum ground subsidence and excavation depth of foundation pit

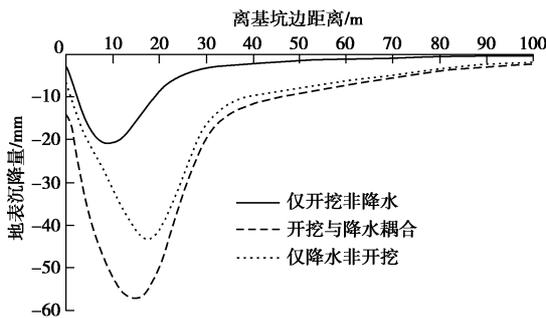


图 12 地表沉降与开挖和降水关系曲线

Fig. 12 Relationship between location of maximum ground subsidence and excavation depth of foundation pit

3.5 地表沉降影响分区

悬挂式帷幕基坑周边地表沉降范围由降水引起的地表沉降范围来控制, 因江漫滩悬挂式帷幕基坑大都为降低承压含水层, 根据式 (1) 计算承压含水层的影响半径 R_w , 计算的降水影响半径范围 R_w 在 110.0~137.8 m 之间, 其与基坑深度的比值 R_w/h_e 在 5.42~7.46 之间, 均值为 6.62。根据实测的地表沉降值和计算的 R_w 进行归一化后曲线见图 13。从图可以看出, 悬挂

式帷幕基坑地表沉降影响范围远大于全止水帷幕基坑, 全止水帷幕基坑地表曲线均位于 Clough 等^[3]、Hsieh 等^[5]和 Hashash 等^[22]包络线内, 悬挂式帷幕基坑地表沉降曲线部分位于 Hashash 等^[22]包络线之外, 造成这种结果的原因可能是 Hsieh 等^[5]和 Hashash 等^[22]统计包络线未考虑降水的影响。

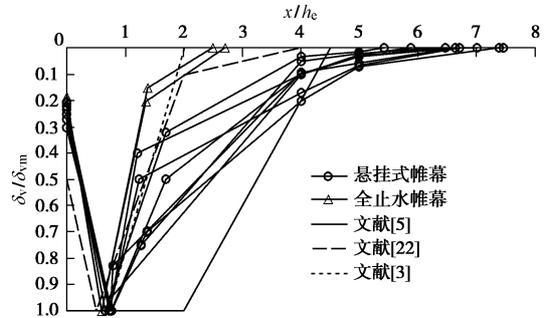


图 13 地表沉降归一化曲线

Fig. 13 Normalized curves of ground subsidence

上海市基坑工程技术规范^[23]板式支护体系针对上海地区若干基坑的地表沉降统计情况, 其近似的地表沉降分布曲线与 Hsieh 等^[5]建议的地表沉降曲线相似, 即最大地表沉降发生于 $(0\sim 1.0)h_e$ 的区域, 在 $(1.0, 2.0)h_e$ 范围内地表沉降逐渐减小, 而在 $(2.0\sim 4.0)h_e$ 范围内地表沉降由较小值衰减到可忽略的程度, 将 $1.0h_e$ 、 $2.0h_e$ 和 $4.0h_e$ 作为划分基坑环境保护等级时建筑物所处位置的分界点。城市轨道交通工程监测技术规范^[24]对上海地区地表沉降主要影响区分界点采用 $h_e \tan(45-\varphi/2)$, 当 $\varphi=0$, 主要影响区最大范围为 $1.0h_e$, 次要影响区分界点采用 $(2.0\sim 3.0)h_e$, 在此范围之外为可能影响区。借鉴上述规范对工程影响分区的划分, 根据沉降影响程度, 将悬挂式帷幕基坑周边地表沉降影响范围分为三个区, 主要影响区由基坑开挖和降水共同作用引起的地面沉降区域, 次要影响区主要由降水引起的地面沉降区域, 轻微影响区为由降水引起的地面沉降区域。

主要影响区由基坑开挖引起的地表沉降范围来控制, 其影响范围采用地下连续墙深度 H 和实测的最大沉降点位置 x_{vm} 来界定。当以地下连续墙深度 H 界定时, 主要影响区范围 R_1^H 为^[25]

$$R_1^H = H \tan(45^\circ - \varphi/2) \quad (4)$$

式中, H 为地下连续墙深度 (m), φ 为地下连续墙所穿越土层的平均内摩擦角 ($^\circ$)。

由于基坑开挖与降水引起的地面曲线往往不服从正态分布密度函数, 且基坑边缘地表沉降一般不为零, 因此主要影响区范围内沉降曲线可采用下式来表达:

$$s(x) = -(Ax + s_0)e^{-\pi\left(\frac{x}{2r}\right)^2} \quad (5)$$

式中 A , s_0 和 r 为待定参数。 s_0 为基坑边缘处地表沉

降值，即 $x=0$ 处的地表沉降值； r 为地表沉降最大点到主要影响区边缘的距离。对式 (5) 进行求导，并令导数等于 0，可得地表最大沉降值处横坐标 $x_m = \sqrt{2r^2/\pi + s_0^2/4A^2} - s_0/2A$ 。因为 s_0 一般都较小，上式可取近似值 $x_m = \sqrt{2r^2/\pi}$ ，即 $r = \sqrt{\pi}x_m/2 = 1.25x_m$ 。因此，当以最大沉降点位置 x_{vm} 来界定时，主要影响区范围为 R_1^m ：

$$R_1^m = x_{vm} + r = x_{vm} + 1.25x_{vm} = 2.25x_{vm} \quad (6)$$

根据式 (4) 计算的地表沉降主要影响区范围 R_1^H 和式 (6) 计算的主要影响区范围 R_1^m 及二者与基坑深度 h_e 的比值列于图 14。从图上可以看出，由式 (4) 计算的地表沉降范围 R_1^H 在 20.7~29.1 m 之间，其与基坑深度 h_e 的比值 R_1^H/h_e 在 1.24~1.53 范围之间，均值为 1.35。由式 (6) 计算的地表沉降 R_1^m 在 20.3~29.3 m 范围之间，其与基坑挖深的比值 R_1^m/h_e 在 1.19~1.46 范围之间，均值为 1.33。因此可选取悬挂式止水帷幕基坑地表主要影响区的范围为基坑周边 $1.35h_e$ 。

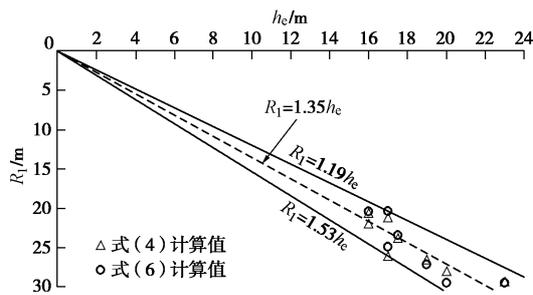


图 14 主要影响区半径 R_1 与基坑挖深 h_e 关系

Fig. 14 Relationship between radius of main influence zone and excavation depth of foundation pit

次要影响区地面沉降主要由降水引起，当以 $4h_e$ 作为分界处，此分界处的沉降平均值约为 $0.1\delta_{vm}$ ，与上海市基坑工程技术规范^[23]影响分区划分恰好吻合。 $4h_e \sim 7h_e$ 区域为轻微影响区，由降水引起的地面沉降区域。图 15 为江漫滩区悬挂式帷幕基坑的地表沉降影响分区、上海市基坑工程技术规范^[23]板式支护体系基坑开挖引起围护墙后的地表沉降影响分区和城市轨道交通工程监测技术规范^[24]中针对上海地区地表沉降影响分区对比曲线图。从图上可以看出，江漫滩区悬挂式帷幕基坑地表沉降影响范围最大，其主要原因是坑内降水影响区域要大于上海软土地区基坑开挖引起的地表沉降范围。江漫滩区悬挂式帷幕基坑最大地表沉降的位置 $0.7h_e$ 要大于上海市基坑工程技术规范^[27]中最大地表沉降点位置 $0.5h_e$ ；本文将悬挂式帷幕基坑距围护墙外侧距离 $1.35h_e$ 范围作为主要影响区域，在 $x=1.35h_e$ 处地表沉降占最大沉降的 0.34，而仅由土方开挖引起的地表沉降约占最大沉降的 0.11，这与上海市基坑工程技术规范将 $x/h=0.1s_{max}$ 范围内作为主影响

区域基本吻合。上海市基坑仅由土方开挖引起的地表沉降范围大于南京江漫滩区基坑仅由土方开挖引起地表沉降范围的主要原因是南京江漫滩区上部为软黏土，软黏土中夹薄层砂，下部为砂砾层，其物理力学指标要优于上海软黏土。

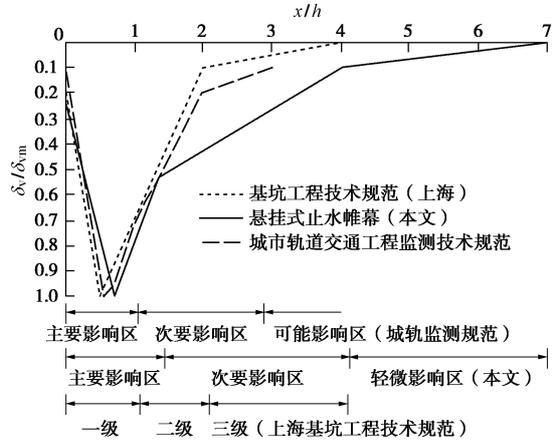


图 15 地表沉降影响分区划分

Fig. 15 Influence zoning of ground subsidence

3.6 地表沉降曲线形态表达

软土地区基坑开挖引起地表沉降曲线形态常用指数函数、正态分布函数或抛物线来描述。如对于板式内支撑支护基坑，北京理正软件采用二次抛物线形式，同济启明星软件采用 peck 曲线（高斯函数）和抛物线曲线。悬挂式止水帷幕基坑的地表由于水土耦合作用，其沉降曲线用一种形态曲线来表达精度较差。在主要影响区范围内，地表沉降曲线形态往往不服从正态分布密度函数曲线，可采用式 (5) 表达，在主要影响区之外可采用指数函数曲线来描述。中间风井基坑悬挂式止水帷幕在主要影响区内采用式 (5) 拟合地表沉降曲线见图 16，万汇城站全止水帷幕基坑地表沉降曲线函数拟曲线见图 17。

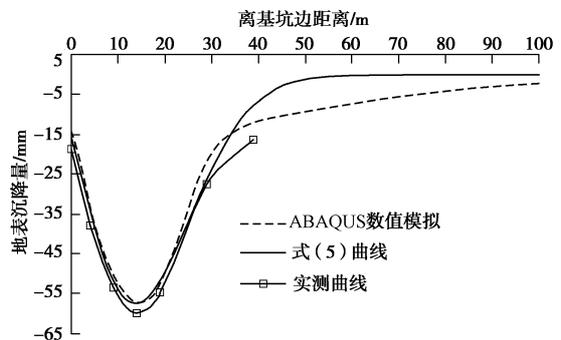


图 16 中间风井基坑地表沉降拟合曲线

Fig. 16 Fitting curves of ground subsidence of middle airshaft foundation pit

从图 16、17 拟合曲线和实测曲线的对比可以看出，在主要影响区范围内，不论是悬挂式止水帷幕还是全止水帷幕基坑公式 (5) 拟合精度均较高，对地表沉降预测有较强的实用性，但在主要影响区之外悬挂

式止水帷幕基坑地表沉降公式 (5) 预测精度较差。

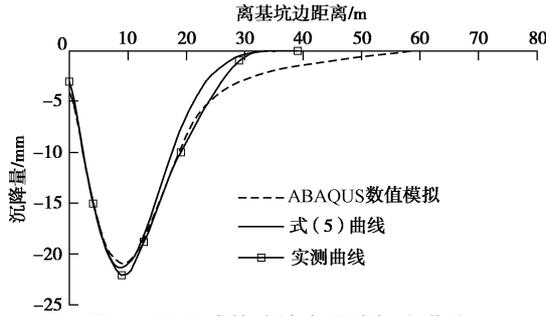


图 17 万汇城基坑地表沉降拟合曲线

Fig. 17 Fitting curves of ground subsidence of foundation pit of Wanhuicheng

悬挂式帷幕地表沉降在主要影响区之外主要由降水引起, 对中间风井基坑主要影响区以外的沉降采用指数函数进行拟合, 拟合曲线如图 18。从图可以看出, 指数函数能较好的模拟主要影响区之外的地表沉降曲线形态。

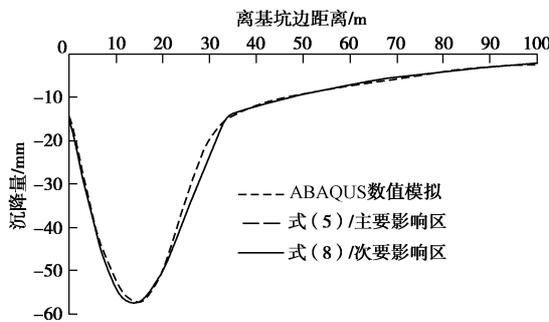


图 18 中间风井基坑地表沉降分段拟合曲线

Fig. 18 Piecewise fitting curves of ground subsidence of middle airshaft foundation pit

综上所述, 全止水帷幕和悬挂式帷幕基坑周边地表沉降曲线均为凹槽型, 对于全止水帷幕基坑开挖引起的地表沉降曲线可用单一函数进行拟合, 对于悬挂式止水帷幕可根据工程影响分区分段选用不同的曲线来表达。在主要影响区范围内的地表沉降曲线采用式 (7) 来表达, 对主要影响区之外的地表沉降曲线采用式 (8) 来表达。因此按分区表达的地表沉降计算公式:

$x \leq 1.35h_e$ 时,

$$s_1(x) = -(Ax + s_0)e^{-\pi\left(\frac{x}{2r}\right)^2} ; \quad (7)$$

$x > 1.35h_e$ 时,

$$s_2(x) = Ke^{-\frac{x}{m}} 。 \quad (8)$$

4 结 论

(1) ABAQUS 有限元能够考虑流固耦合作用, 较好的模拟计算坑外地表沉降大小, 考虑流固耦合作用的坑外地表沉降远大于不考虑流固耦合作用的地表沉降。

(2) 地下连续墙墙体的最终形态为内凸胀肚型, 墙顶水平位移不完全都是朝坑内移动, 悬挂式止水帷幕和全止水帷幕基坑地下连续墙最大水平位移与基坑挖

深的比值差异不大, 最大水平位移点深度位于坑底附近。

(3) 悬挂式帷幕基坑地表沉降为同等条件下不考虑降水影响的全止水帷幕基坑 2 倍多, 仅由降水引起的地表沉降所占比例 0.48~0.69, 平均值为 0.54, 降水引起的地表沉降不可忽视。

(4) 悬挂式止水帷幕深基坑最大地表沉降点位置离坑边的距离与基坑开挖深度的比值在 0.65~0.76 之间, 最大沉降点位置离坑边的距离为 12.0~15.0 m。悬挂式止水帷幕基坑最大地表沉降点位置要比全止水帷幕基坑大 1.0~3.0 m; 仅由降水引起的地表沉降并不与水位线一致, 最大地表沉降点位置要远远大于仅由土方开挖引起的最大地表沉降点位置。

(5) 悬挂式止水帷幕基坑周边地表沉降范围可以划分为 3 个区, 主要影响区为基坑周边 $1.35h_e$, 次要影响区为基坑周边 $1.35h_e \sim 4h_e$ 范围内, 轻微影响区为基坑周边 $4h_e$ 范围以外。

(6) 全止水帷幕和悬挂式帷幕基坑地表沉降曲线形态均为凹槽型, 全止水帷幕基坑开挖引起的地表沉降曲线可用单一函数进行拟合, 悬挂式帷幕基坑可根据工程影响分区选用不同的函数来表达。

参考文献:

- [1] PECK R B. Deep excavation and tunneling in soft ground[C]// Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, State-of-the-Art -Volume. Mexico City, 1969: 225 - 290.
- [2] MANA A I, CLOUGH G W. Prediction of movements for braced cuts in clay[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 1981, 107(6): 759 - 777.
- [3] CLOUGH G W, O'ROURKE T D. Construction induced movements of in situ walls[C]// Proceedings, ASCE Conference on Design and Performance of Earth Retaining Structures, Geotechnical Special Publication No. 25. New York: ASCE, 1990: 439 - 470.
- [4] OU C Y, HSIEH P G, CHIOU D C. Characteristics of ground surface settlement during excavation[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1993, 30(5): 758 - 767.
- [5] HSIEH P G, OU C Y. Shape of ground surface settlement profiles caused by excavation[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1998, 35(6): 1004 - 1017.
- [6] LONG M. Database for retaining wall and ground movements due to deep excavations[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2001, 127(3): 203 - 224.
- [7] MOORMANN C. Analysis of wall and ground movements due

- to deep excavations in soft soil based on a new worldwide database[J]. *Soils and Foundations*, 2004, **44**(1): 87 - 98.
- [8] LEUNG E H Y, NG C W W. Wall and ground movements associated with deep excavations supported by cast in situ wall in mixed ground conditions[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 2007, **133**(2): 129 - 143.
- [9] 王卫东, 徐中华, 王建华. 上海地区深基坑周边地表变形性状实测统计分析[J]. *岩土工程学报*, 2011, **33**(11): 1659 - 1666. (WANG Wei-dong, XU Zhong-hua, WANG Jian-hua. Statistical analysis of characteristics of ground surface settlement caused by deep excavations in Shanghai soft soils[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, **33**(11): 1659 - 1666. (in Chinese))
- [10] 吴锋波, 金淮, 朱少坤. 北京市轨道交通基坑工程地表变形特性[J]. *岩土力学*, 2016, **37**(4): 1066 - 1074. (WU Feng-bo, JIN Huai, ZHU Shao-kun. Ground deformation characteristics of foundation pit related to the urban rail transit in Beijing[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, **37**(4): 1066 - 1074. (in Chinese))
- [11] 李淑, 张顶立, 房倩, 等. 北京地铁车站深基坑地表变形特性研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2012, **31**(1): 189 - 198. (LI Shu, ZHANG Ding-li, FANG Qian, et al. Research on characteristics of ground surface deformation in Beijing subway[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, **31**(1): 189 - 198. (in Chinese))
- [12] 王昆泰, 胡立强, 吕凯歌. 悬挂式帷幕条件下基坑渗流特性的计算分析[J]. *建筑科学*, 2010, **26**(1): 81 - 84. (WANG Kun-tai, HU li-qiang, LÜ Kai-ge. Analysis for seepage of deep foundation pit with hanging impervious purdah[J]. *Building Science*, 2010, **26**(1): 81 - 84. (in Chinese))
- [13] 周火焱, 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): 470 - 473. (ZHOU Huo-yao, WANG Hua-qin, ZHANG Wei-quan. Application of pensile impervious curtain to excavations[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2012, **34**(S0): 470 - 473. (in Chinese))
- [14] 张兴胜, 卢耀如, 王建秀, 等. 上海悬挂式地下连续墙基坑渗流侵蚀引起的沉降研究[J]. *岩土工程学报*, 2014, **36**(增刊 2): 284 - 290. (ZHANG Xing-sheng, LU Yao-ru, WANG Jian-xiu, et al. Land subsidence caused by pits seepage erosion of deep foundation with suspended diaphragm walls in Shanghai[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2014, **36**(S2): 284 - 290. (in Chinese))
- [15] 薛丽影, 杨斌, 刘丰敏, 等. 基坑工程地下水渗流模型试验系统研究[J]. *岩土工程学报*, 2017, **39**(增刊 1): 126 - 130. (XUE Li-ying, YANG Bin, LIU Feng-min, et al. Model test system for groundwater seepage in foundation pit engineering[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2017, **39**(S1): 126 - 130. (in Chinese))
- [16] JGJ 120—2012 建筑基坑支护技术规程[S]. 2012. (JGJ 120—2012 Technical specification for retaining and protection of building foundation excavations[S]. 2012. (in Chinese))
- [17] 刘世涛, 程培峰. 基于 ABAQUS 土体数值分析的本构模型[J]. *低温建筑技术*, 2010, **140**(2): 90 - 92. (LIU Shi-tao, CHENG Pei-feng. Based on ABAQUS for numerical analysis of soil constitutive model[J]. *Low Temperature Architecture Technology*, 2010, **140**(2): 90 - 92. (in Chinese))
- [18] 赵锡宏, 姜洪伟, 袁聚云, 等. 上海软土各向异性弹塑性模型[J]. *岩土力学*, 2003, **24**(3): 322 - 330. (ZHAO Xi-hong, JIANG Hong-wei, YUAN Ju-yun, et al. Anisotropically elastoplastic model of Shanghai soft soils[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2003, **24**(3): 322 - 330. (in Chinese))
- [19] TAN Y, WANG D L. Characteristics of a large-scale deep foundation pit excavated by the central-island technique in Shanghai soft clay: I Bottom-up construction of the central cylindrical shaft[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2013, **139**(11): 1875 - 1893.
- [20] TAN Y, WANG D L. Characteristics of a large-scale deep foundation pit excavated by the central-island technique in Shanghai soft clay: II Top-down construction of the peripheral rectangular pit[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2013, **139**(11): 1894 - 1910.
- [21] WANG J H, XU Z H, WANG W D. Wall and ground movements due to deep excavations in Shanghai soft soils[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2010, **136**(7): 985 - 994.
- [22] HASHASH Y M A, OSOULI A, MARULANDA C. Central artery/tunnel project excavation induced ground deformations[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2008, **134**(9): 1399 - 1406.
- [23] DJ/TJ08—61—2010 基坑工程技术规程[S]. 2010. (DJ/TJ08—61—2010 Technical code for excavation engineering[S]. 2010. (in Chinese))
- [24] GB 50911—2013 城市轨道交通工程监测技术规范[S]. 2013. (GB 50911—2013 Code for monitoring measurement of urban rail transit engineering[S]. 2013. (in Chinese))
- [25] 刘国斌, 王卫东. 基坑工程手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009. (LIU Guo-bin, WANG Wei-dong. Excavation engineering handbook[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009. (in Chinese))