

doi: 10.19388/j.zgdzdc.2019.01.10

引用格式: 严学新,王寒梅,杨天亮,等. 滨海地区深基坑减压降水地面沉降研究成果及应用——以上海市为例[J]. 中国地质调查,2019,6(1):67-74.

滨海地区深基坑减压降水地面沉降研究成果及应用 ——以上海市为例

严学新^{1,2,3}, 王寒梅^{1,2,3}, 杨天亮^{1,2,3}, 黄鑫磊^{1,2,3}, 占光辉^{1,2,3}, 何晔^{1,2,3}

(1. 国土资源部地面沉降监测与防治重点实验室, 上海 200072; 2. 上海市地质调查研究院, 上海 200072; 3. 上海地面沉降控制工程技术研究中心, 上海 200072)

摘要: 针对地下空间开发中深基坑减压降水地面沉降发育特征、沉降机制及防治对策等研究进展, 以上海市为例, 总结了近年来滨海地区深基坑减压降水地面沉降研究取得的主要成果。建立了深基坑减压降水地面沉降防治综合分区方法, 探索了深基坑减压降水地面沉降防治原型试验设计方法, 掌握了上海市浅部承压含水层深基坑减压降水地面沉降规律, 提出了深基坑减压降水地面沉降-地下水位双控模式及控制指标, 提出了深基坑减压降水地面沉降防治措施, 构建了深基坑减压降水地面沉降管控体系。这些研究成果在特大型城市安全管理、重大市政工程建设及运营服务中得到应用, 对同类地区地面沉降研究和防治工作具有借鉴意义。

关键词: 滨海地区; 深基坑降水; 地面沉降; 管控体系

中图分类号: P642.26

文献标志码: A

文章编号: 2095-8706(2019)01-0067-08

0 引言

近年来,上海市城市建设高速发展,工程建设活动频繁,特别是地下空间开发规模、强度和深度越来越大,导致城市地区不均匀地面沉降现象越来越严重,尤其是深基坑减压降水引发的地面沉降问题^[1],严重威胁着建筑物安全及周围环境,对重大市政工程建设及安全运营造成了不同程度的危害。目前,针对深基坑减压降水引发的地面沉降问题,一些专家和学者从基坑降水优化^[2]、地面变形机制及规律^[3]、人工回灌技术^[4]等方面进行了研究,但这些研究主要关注工程自身的安全及周边保护对象,对3H(H为基坑开挖深度)范围外地面沉降及其对城市工程安全造成的危害关注较少。此外,依托在建工程开展地面沉降原型试验的相关研究也较少,地面沉降防治措施缺乏系统性总结及工程实践。近些年来,作者所在的科研团队从区域地面沉降防治需求

出发,结合建设工程全流程管理思路,通过理论研究、现场试验、案例分析、数值模拟及示范应用,系统地开展了深基坑减压降水地面沉降研究工作^[5-19]。本文以上海市为例,总结了近年来滨海地区深基坑减压降水地面沉降的主要研究成果和应用,为深基坑减压降水地面沉降防治实践提供了思路,也为同类地区地面沉降研究和防治工作提供了参考。

1 研究区概况

上海是我国最早受地面沉降危害的城市之一,特殊的地质环境是引发该市地面沉降的主要内因^[12],地下水不合理开采和工程建设活动是近期引发该市地面沉降的主要外因^[19]。从1921年发现地面沉降现象以来,上海市中心城区累计地面沉降超过2 m,最严重地区累计地面沉降达3 m,对城市安全和社会经济可持续发展构成了严重威胁^[19]。近年来,随着地面沉降研究工作的不断深入和防治工作

收稿日期: 2018-08-21; 修订日期: 2018-11-15。

基金项目: 国际地球科学计划“沿海城市地面沉降的影响因素、机理与监测(编号: IGCP 663)”、国土资源部公益性行业科研专项经费“滨海地区工程建设引发地面沉降机理及控制措施研究(编号: 201311045)”和上海市科学技术委员会科研计划“深基坑降水地面沉降机理与控制关键技术研究、基础设施建设与运营中的地下地质安全控制技术(编号: 12231200700、18DZ1201100)”联合资助。

第一作者简介: 严学新(1961—),男,教授级高级工程师,主要从事城市地质研究。Email: yanxx@sgs.com.cn。

通信作者 万方数据 黄鑫磊(1986—),男,工程师,主要从事地面沉降研究。Email: huangxl2009@126.com。

的不断强化,区域地面沉降问题已得到有效控制,目前进入微量沉降阶段,但仍存在不均匀沉降现象。

上海作为典型的三角洲沉积平原,区内第四系覆盖层巨厚,与工程地质建设密切相关的 100 m 以浅地基土层主要由海相黏性土、粉性土与砂性土成层交替组成,不同地层结构差异较大。结合土层沉积年代及成因,自上而下可划分为 9 个主要工程地质层(表 1)。其中,黏性土含水率较高,土层多以

软塑状、可塑状为主,前期固结程度较低,可压缩性较高;粉性土和砂性土呈饱和状,较松散,在地下水位下降时易压密下沉,具有较大的压缩性^[18]。

上海地区与工程建设密切相关的浅部承压含水层主要有微承压含水层、第一承压含水层和第二承压含水层,施工中的突涌水及渗透破坏等承压水问题是深基坑工程施工面临的重大地质问题之一^[20]。为保障工程安全,深基坑施工过程中普遍

表 1 上海地区与工程地质建设密切相关的典型地层层序
Tab.1 Typical stratigraphic sequence related to engineering construction in Shanghai

年代地层	土层序号	土层名称	顶面埋深/m	层厚/m	状态或密实度	压缩性	分布特征	工程地质特性	水文地质特性
全新统	①	填土	0	0.5~3.0	松散	/	遍布	与填土物密切相关	/
	Qh ³	② ₁ 褐黄色黏性土	0.5~2.0	1.5~2.0	可塑	中等	遍布	俗称“硬壳层”,是良好的天然地基持力层	/
		② ② ₂ 灰黄色黏性土	1.5~2.0	0.5~2.0	软塑	中—高等	遍布	/	/
		② ₃ 灰色粉性土、粉砂	2.0~3.0	3.0~15.0	松散—稍密	中等	苏州河以北、长江口砂岛	浅部砂层,存在地震液化和流沙可能性	潜水含水层
	Qh ²	灰色淤泥质粉质黏土	3.0~7.0	5.0~10.0	流塑	高等	遍布	第一软土层,受工程建设活动影响,是浅部主要压缩层	/
		④ 灰色淤泥质黏土	7.0~12.0	5.0~10.0	流塑	高等	遍布		
	Qh ¹	⑤ ₁ 褐灰色黏性土	15.0~20.0	5.0~15.0	软塑—可塑	中—高等	遍布	第二软土层,是工程建设影响的主要压缩层之一	/
		⑤ ⑤ ₂ 灰色粉性土、粉砂	20.0~30.0	5.0~20.0	稍密—中密(局部密实)	中等	古河道区	中部砂层,分布稳定时是较好的桩基持力层	微承压含水层
		⑤ ₃ 灰—褐灰色黏性土	25.0~32.0	9.0~20.0	软塑	中等	古河道区	第二软土层,是工程建设影响的主要压缩层之一	/
		⑤ ₄ 灰绿色黏性土	35.0~46.0	1.0~3.0	可塑—硬塑	中等	古河道区	/	/
上更新统	⑥	暗绿色黏性土	15.0~30.0	2.0~5.0	可塑—硬塑	中等	局部受古河道切割缺失	第一硬土层	/
	Qp ³⁻²	⑦ ₁ 草黄—灰色粉性土、粉砂	20.0~35.0	4.0~8.0	中密—密实	中等	分布广泛,厚度变化大	第一砂层,是良好的桩基持力层,对深基坑工程影响较大	第一承压含水层,是深基坑工程主要降水目的层
		⑦ ⑦ ₂ 灰色粉细砂	35.0~40.0 (43.0~55.0)	6.0~30.0	密实	中—低等	分布广泛,层位不稳定		
	⑧	⑧ ₁ 灰色黏性土	30.0~50.0	10.0~20.0	软塑—可塑	高一中等	分布广泛,局部缺失	第三软土层	/
		⑧ ₂ 灰色粉质黏土、粉砂互层	50.0~60.0	5.0~20.0	可塑或中密	中等	分布广泛,局部缺失	呈“千层饼”状,是较好的桩基持力层	/
	Qp ³⁻¹	⑨ ₁ 青灰色粉细砂	60.0~70.0	5.0~10.0	中密—密实	中—低等	分布较稳定	第二砂层,是良好的桩基持力层	第二承压含水层,局部与第一承压含水层沟通
		⑨ ⑨ ₂ 青灰色粉、细砂夹中、粗砂	70.0~81.0	5.0~20.0	密实	低等	分布较稳定		

采取减压降水措施。浅部承压含水层,水头较高,尤其是第一、二承压含水层及其沟通区,水量相对丰富,在悬挂式或敞开式帷幕下,深基坑减压降水对周边地质环境影响较大^[10-11]。现场试验结果^[14-15]表明,深基坑减压降水是当前诱发不均匀地面沉降的重要因素之一。

2 主要成果

2.1 建立了深基坑减压降水地面沉降防治综合分区方法

深基坑减压降水引发的地面沉降与工程地质结构、基坑开挖深度、隔水帷幕深度、基坑面积、基坑形状和施工周期有关,其中工程地质结构、基坑

开挖深度和隔水帷幕深度是影响基坑周围水位降深的主要因素。

从市域尺度研究深基坑减压降水引发的地面沉降规律,建立了综合考虑上海地貌类型-沉积环境-地层组合-降水目的层结构-隔水帷幕插入深度的深基坑减压降水地面沉降防治综合分区方法^[18]。针对微承压含水层、第一承压含水层和第二承压含水层深基坑工程主要降水目的含水层,分别编制了上海市深基坑减压降水地面沉降防治综合分区图及其特征表,这些是上海市深基坑减压降水地面沉降防控系统研究和决策的基础单元。上海第一承压含水层深基坑减压降水地面沉降综合分区及其特征见图1和表2。

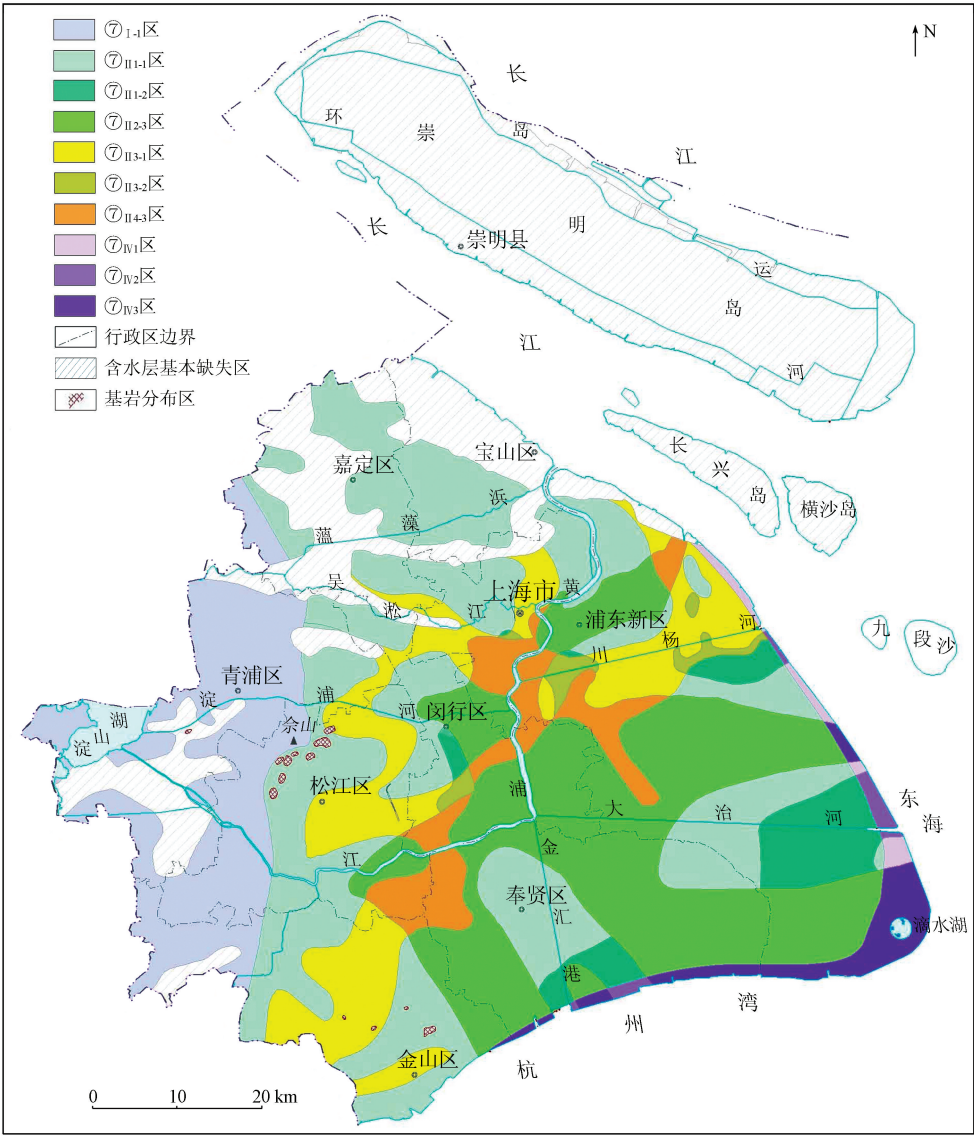


图1 上海第一承压含水层深基坑减压降水地面沉降防治综合分区

Fig.1 Prevention partition of the land subsidence caused by deep foundation pits dewatering of the first confined aquifer in Shanghai

万方数据

表 2 上海第一承压含水层深基坑减压降水地面沉降防治综合分区特征

Tab.2 Characteristics of prevention partition of the land subsidence caused by deep foundation pits dewatering of the first confined aquifer in Shanghai

分区	地层特征	
	地层组合	含水层底板埋深 B/m
⑦ _{I-1}	湖沼平原区 两层硬土层分布区	$30 < B \leq 60$
⑦ _{II-1-1}	滨海平原正常沉积区	⑥层、⑧层均分布区 $30 < B \leq 60$
⑦ _{II-1-2}		$B > 60$
⑦ _{II-2-3}		⑤层分布、⑧层缺失区 第一、二承压含水层沟通
⑦ _{II-3-1}	滨海平原古河道区	⑥层缺失、⑧层分布区 $30 < B \leq 60$
⑦ _{II-3-2}		$B > 60$
⑦ _{II-4-3}		⑤层、⑧层均缺失区 第一、二承压含水层沟通
⑦ _{IV-1}	潮坪地貌区	$30 < B \leq 60$
⑦ _{IV-2}		$B > 60$
⑦ _{IV-3}		第一、二承压含水层沟通

2.2 探索了深基坑减压降水地面沉降防治原型试验设计方法

以在建深基坑工程为例,探索深基坑减压降水地面沉降防治原型试验设计方法,提出了原型试验场平面布局和设施结构的技术框架,研发了自来水、原水两用的浅层地下水回灌系统^[9],建设了包括水位监测井、地面沉降监测剖面、土体分层沉降监测标组、浅层地下水人工回灌系统及孔隙水压力监测孔等设施的原位综合试验场(图 2)。根据深基坑减压降水工程进度,同步开展了地面沉降监测控制技术研究,进一步掌握了深基坑减压降水地面沉降时空规律。开展了原位回灌试验研究,获取了浅层地下水人工回灌参数,进一步验证了深基坑减压降水过程中人工回灌的控沉效果。

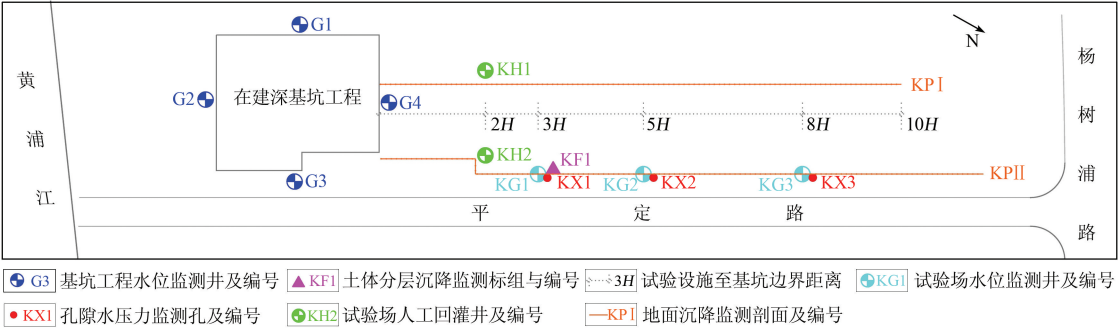


图 2 某典型深基坑减压降水地面沉降防治原型试验设计

Fig.2 Prevention prototype test design of land subsidence caused by deep foundation pits dewatering

2.3 掌握了上海市浅部承压含水层深基坑减压降水地面沉降规律

通过分析 10 余个典型工程案例^[6,11,15],发现距

离悬挂式帷幕基坑越近,各土层差异沉降越明显,且存在关键点,降水目的含水层上覆土层是主要沉降层(图 3),减压降水地面沉降主要影响范围在

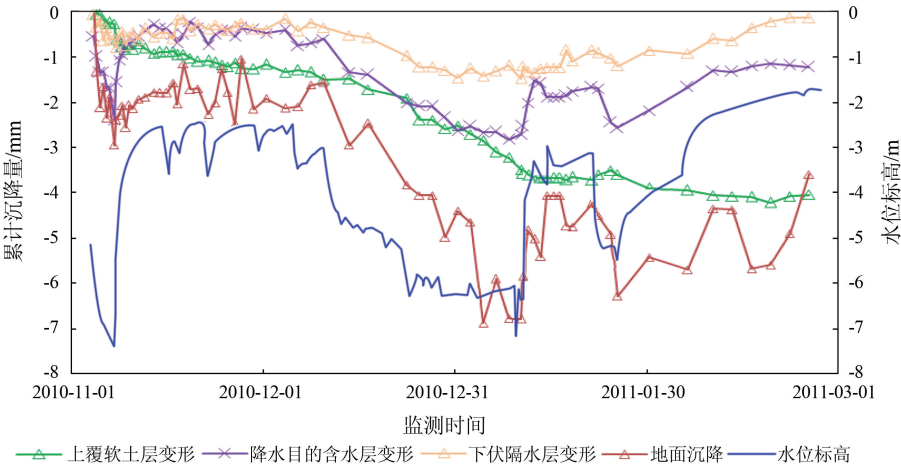


图 3 某典型深基坑 3H 处地下水与土体分层累计沉降历时曲线

Fig.3 Duration curve of cumulative settlement for groundwater level and layered soil at the 3H point of one deep foundation pit

3H内,最大影响范围可达10H(图4)。基于深基坑减压降水地面沉降防治综合分区结果,综合考虑深基坑长宽比、面积、开挖深度、止水帷幕深度、水位降深等工程参数,构建了4700余个全市域

多尺度数学模型,系统掌握了上海市浅部承压含水层深基坑减压降水全过程的水位降深与地面沉降规律,为地面沉降控制指标研究提供了基础依据。

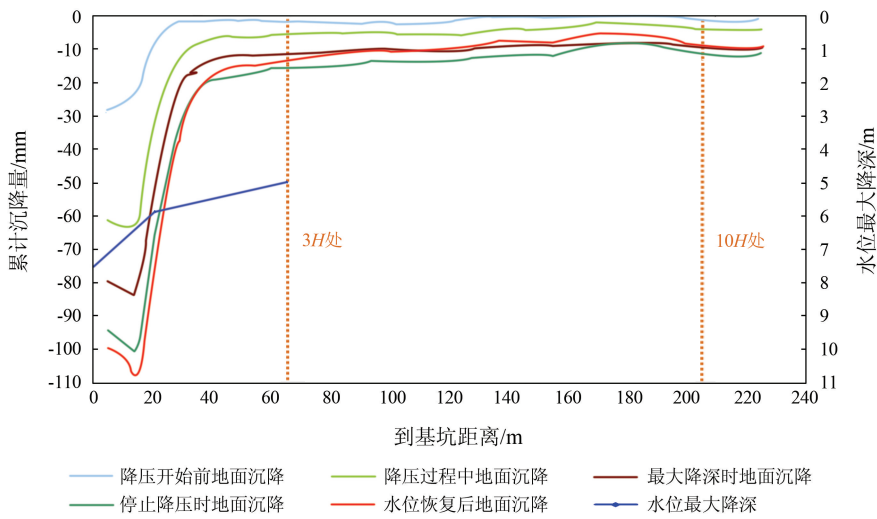


图4 某典型深基坑减压降水不同阶段地面沉降纵剖面特征

Fig.4 Longitudinal profile characteristics of land subsidence caused by deep foundation pits dewatering at different stages

2.4 提出了深基坑减压降水地面沉降-地下水位双控模式及控制指标

基于深基坑减压降水地面沉降典型案例^[10,15],坑内减压降水对坑外地面沉降影响范围可达10H,其中地面沉降显著区主要出现在2H~3H范围内。由于3H范围内地面沉降受土体开挖、减压降水、结构变形及机械施工等影响,3H范围外地面沉降量与地下水位降深呈显著正相关,主要受基坑减压降水单因素影响。结合深基坑工程施工监测要求和地面沉降监控设施布设场地限制等实践经验,从地质环境保护角度出发,明确将3H作为关键控制点。地面沉降属缓变型地质灾害,发育过程具有滞后性,且发生后难以治理和恢复^[17]。考虑到地下水位变化的灵敏性和监控的便捷性,提出了深基坑减压降水地面沉降-地下水位双控模式^[9],即通过对关键控制点处地下水位的控制和地面沉降的监测,实现3H范围外地面沉降控制目标。

在市域尺度深基坑减压降水水位降深与地面沉降规律研究基础上,利用数值模拟大数据,对距离基坑3H处地面沉降量与止水帷幕插入目的含水层深度、基坑开挖深度、基坑面积、基坑长宽比等影

响因素^[18]进行相关性分析。通过多元回归分析法进行拟合,建立了不同综合分区深基坑减压降水关键控制点的水位降深和地面沉降半经验预测公式。

(1)关键控制点水位降深值计算公式:

$$D_s=(a_1\times M+b_1\times H+c_1/D)^{f_1}(d_1+e_1\times P)^{g_1}。$$

(1)

式中: D_s 为关键控制点降水目的含水层水位降深值,m; D 为隔水帷幕插入降水目的含水层深度,m; H 为基坑开挖深度,m; M 为基坑面积,m²; P 为基坑长宽比; a_1 、 b_1 、 c_1 、 d_1 、 e_1 、 f_1 、 g_1 为水位降深计算经验系数。

(2)关键控制点地面沉降量计算公式:

$$C_s=(a_2\times M^{1/2}+b_2\times H+c_2/D^{1/3})^{f_2}\times (d_2+e_2\times P)^{g_2}。$$

(2)

式中: C_s 为关键控制点地面沉降量,mm; D 为隔水帷幕插入降水目的含水层深度,m; H 为基坑开挖深度,m; M 为基坑面积,m²; P 为基坑长宽比; a_2 、 b_2 、 c_2 、 d_2 、 e_2 、 f_2 、 g_2 为地面沉降计算经验系数。

结合上海市地面沉降控制目标和基坑周边环境

保护要求,以上海全域为研究尺度,基于提出的半经验公式,利用拟合分析取得的经验系数,量化确定了关键控制点处水位降深和地面沉降量控制指标,为工程性地面沉降防治精细化管控奠定了基础。

2.5 提出了深基坑减压降水地面沉降防治措施

基于大量深基坑减压降水工程实例和典型案例^[10,16],依托4个大型综合试验场,提出了基坑围护结构-工程降水一体化设计新方法,突破了深基坑减压降水地面沉降综合监测及浅层地下水人工回灌中存在的关键技术难题,为深基坑减压降水地面沉降防治提供了技术保障。

(1)提出了深基坑围护结构-工程降水一体化设计新方法。针对悬挂式帷幕基坑类型,提出了基坑抽水量最小、止水帷幕深度最优求解、基坑围护与工程降水设计评估、降水-回灌优化设计等实施路径的基坑围护结构-工程降水一体化设计新方法^[12,17],解决了因基坑围护设计与工程降水设计不合理造成的地面沉降问题,在地下水位和地面沉降控制方面取得了较好的效果。

(2)集成了深基坑减压降水地面沉降监测技术。通过对3H关键控制点地面沉降规律的综合研究,集成了由地面沉降、分层沉降、地下水位、孔隙水压力、抽水量、回灌量、水压力等监测要素组成的

深基坑减压降水地面沉降综合监测方法技术,规范了基坑外3H~10H范围内地面沉降综合监测方案,实现了对深基坑减压降水地面沉降的水平、垂向及分层多维监测,提出了监测预警标准。

(3)突破了浅层地下水人工回灌技术难题。依托大定海泵站、金海路地铁站、祁连山南路地铁站、同济大学地铁站等在建基坑工程现场试验^[8,16],提出了回灌井结构设计、回灌管路系统设计、回灌原水处理等关键技术,突破了浅层地下水人工回灌中存在的浅部含水层渗透性差、回灌井易堵塞、回灌原水对井管具腐蚀性、回灌效率低、回灌能力不足等技术难题,建立了较完善的浅层地下水人工回灌技术体系。

2.6 构建了深基坑减压降水地面沉降管控体系

基于建设工程事前、事中、事后全流程管控的思路,提出了深基坑减压降水地面沉降防治技术路径(图5)。通过集成创新,制定了相关法律法规、技术标准和防治规划等管理措施,将技术审查、施工监管和成果汇交纳入管理流程,构建了深基坑减压降水地面沉降管控体系,为“两局两委”(上海市规划和国土资源管理局、上海市水务局、上海市住房和城乡建设管理委员会和上海市交通委员会)部门联动的地面沉降防治管理新模式提供了技术支撑。

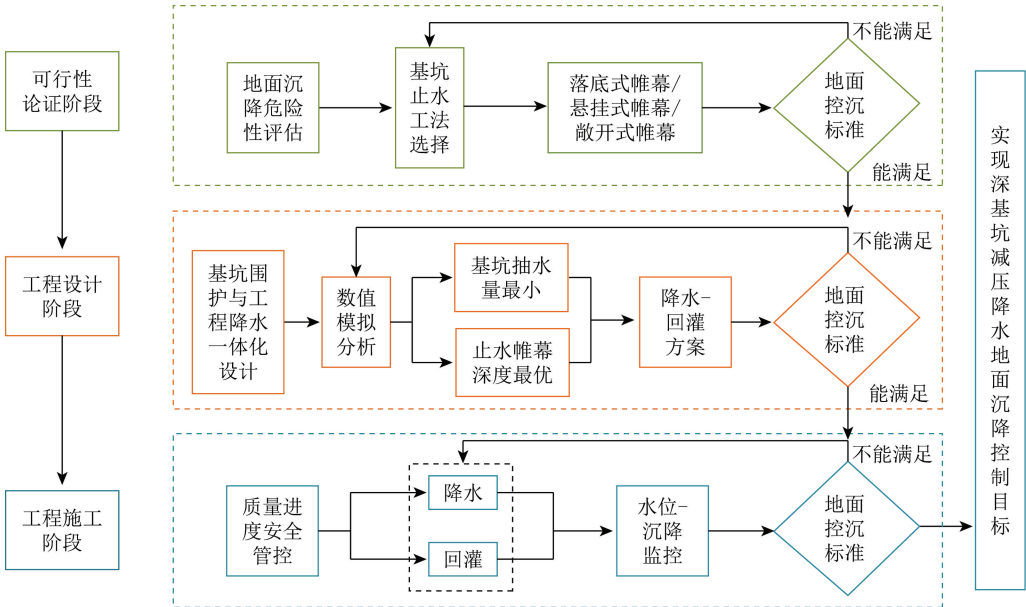


图5 深基坑减压降水地面沉降防治技术路径

3 成果应用

3.1 直接应用于深基坑减压降水地面沉降管控

深基坑减压降水地面沉降控制指标和防治技术及深基坑减压降水地面沉降管控体系等研究成果,已直接应用于上海市深基坑减压降水地面沉降防治工作中,为深基坑减压降水地面沉降管控提供了解决方案,也为地面沉降防治精细化管理提供了决策依据。

3.2 促进特大型城市防灾减灾管理制度完善

上述研究成果为上海市地面沉降监测与防治、地质灾害危险性评估和地面沉降防治工程设计等技术标准的编制和修订提供了技术支撑,为上海市地面沉降防治管理条例、基坑工程管理办法和基坑降水管理规定等法规的出台和实施提供了科学依据,促进了深基坑减压降水地面沉降防治工作的法制化和规范化。

3.3 服务于重大市政工程建设运营安全

上述研究成果在上海地区地质灾害危险性评估、地下空间开发建设、轨道交通运营安全等工程中获得了实践应用,推动了深基坑降水工程地面沉降防治工作,减轻了地下空间开发中不均匀地面沉降对重大市政工程建设运营的影响,对我国滨海城市工程建设引发的地面沉降的防治工作具有引领和示范作用。

4 展望

深基坑减压降水地面沉降研究成果将进一步推动工程性地面沉降研究工作的快速发展,促进城市地质灾害与水文地质、工程地质及环境地质等多学科交叉融合。深基坑减压降水地面沉降精细化管理体系的不断完善,将进一步提升上海市地面沉降防治成效及地质环境安全保障能力,降低不均匀地面沉降的风险和危害,保护地质环境及地下水资源,有助于促进城市建设绿色发展,创造良好的社会效益、环境效益和推广价值。

参考文献:

[1] 叶为民,万敏,陈宝,等.深基坑承压含水层降水对地面沉降

的影响[J].地下空间与工程学报,2009,5(增刊2):1799-1805.

[2] 骆祖江,张月萍,刘金宝.深基坑降水与地面沉降控制研究[J].沈阳建筑大学学报:自然科学版,2007,23(1):47-51.

[3] 王建秀,吴林高,朱雁飞,等.地铁车站深基坑降水诱发沉降机制及计算方法[J].岩石力学与工程学报,2009,28(5):1010-1019.

[4] 陆建生,潘伟强,沈池,等.深基坑承压水抽灌一体化设计及工程应用[J].施工技术,2014,43(1):48-52.

[5] 龚士良,叶为民,陈洪胜,等.上海市深基坑工程地面沉降评估理论与方法[J].中国地质灾害与防治学报,2008,19(4):55-60.

[6] 杨天亮,严学新,王寒梅,等.基坑施工引发的工程性地面沉降研究[J].上海地质,2009(2):15-21.

[7] 严学新,王寒梅,方正,等.上海市工程建设规范《地面沉降监测与防治技术规程》解析[J].上海地质,2009(2):11-14.

[8] 吴建中,王寒梅,杨天亮.浅层地下水人工回灌应用于上海市工程性地面沉降防治的试验研究[J].现代地质,2009,23(6):1194-1200.

[9] 杨天亮,严学新,王寒梅,等.水位与沉降双控模式下浅层地下水压力回灌试验研究[J].上海地质,2010,31(4):12-17.

[10] 杨天亮.深基坑减压降水引发的地面沉降效应分析[J].上海国土资源,2012,33(3):41-44.

[11] 占光辉,何晔,黄鑫磊.上海地铁车站深基坑工程地面沉降防治实例分析[J].上海国土资源,2013,34(2):68-70.

[12] 杨天亮,王寒梅,焦珣.上海地面沉降防治分区管控方法研究[J].上海国土资源,2014,35(4):105-109.

[13] 黄鑫磊,何晔,占光辉.深基坑减压降水设计优化与止水帷幕隔水效应分析[J].上海国土资源,2014,35(2):25-27,61.

[14] 占光辉,黄鑫磊,何晔.基于孔隙水压力变化的深基坑减压降水地面沉降特征分析[J].地质学刊,2014,38(增刊1):287-292.

[15] Yang T L, Yan X X, Wang H M, et al. Comprehensive experimental study on prevention of land subsidence caused by dewatering in deep foundation pit with hanging waterproof curtain [J]. Proc IAHS, 2015, 372: 1-5.

[16] 何晔,黄鑫磊,占光辉.基于现场试验研究的浅层地下水人工回灌影响因素分析[J].上海国土资源,2015,36(3):75-77,82.

[17] 黄鑫磊,占光辉,杨天亮.上海地区基坑减压降水地面沉降特征与防控措施初探[C]//第十三届华东六省一市地学科技论坛文集.南昌:江西省地质学会,2015:351-355.

[18] 杨天亮.深基坑减压降水地面沉降控制综合分区方法研究[J].上海国土资源,2018,39(2):64-69,74.

[19] 王寒梅,焦珣.海平面上升影响下的上海地面沉降防治策略[J].气候变化研究进展,2015,11(4):256-262.

[20] 杨天亮,黄鑫磊.上海深层地下空间开发中的重大地质问题及分层研究[J].上海建设科技,2016(增刊1):26-29.

Major achievements of land subsidence caused by deep foundation pits dewatering in coastal areas and their applications: A case study of Shanghai

YAN Xuexin^{1,2,3}, WANG Hanmei^{1,2,3}, YANG Tianliang^{1,2,3}, HUANG Xinlei^{1,2,3}, ZHAN Guanghui^{1,2,3}, HE Ye^{1,2,3}

(1. *Key Laboratory of Land Subsidence Monitoring and Prevention, Ministry of Land and Resources, Shanghai 200072, China*; 2. *Shanghai Institute of Geological Survey, Shanghai 200072, China*; 3. *Shanghai Engineering Research Center of Land Subsidence, Shanghai 200072, China*)

Abstract: With the rapid expansion of urban construction, especially the increasing of scale, density and depth of exploitation of underground space, uneven subsidence has occurred in Shanghai, a typical thick Quaternary covering area in coastal areas. Taking Shanghai as an example, the authors have studied the characteristics, mechanisms, and control strategies of land subsidence induced by deep foundation pits dewatering, and summarized the major achievements in recent years. The partition method has been proposed to prevent land subsidence caused by deep foundation pits dewatering. The way of test design, based on in-situ experiments, has been explored to prevent land subsidence induced by deep foundation pits dewatering. The laws of land subsidence caused by deep foundation pits dewatering have been summarized in shallow confined aquifer of Shanghai. Besides, the dual-control model, including the dewatering and groundwater, and the control indexes were proposed. Some preventive measures have been summarized and the control system has been established. The results have been applied in safety management, major municipal engineering construction and operation in major cities, which could provide some reference for other similar areas.

Key words: coastal areas; deep foundation pits dewatering; land subsidence; control system

(责任编辑: 刘丹)