

DOI: 10.11779/CJGE2014S2082

黄河冲积平原地区超大型深基坑开挖现场监测分析

徐 飞¹, 王渭明², 张乾青^{1, 3, 4*}, 李术才¹, 李利平¹, 刘洪亮¹, 张 骞¹

(1. 山东大学岩土与结构工程研究中心, 山东 济南 250061; 2. 山东科技大学土木建筑学院, 山东 青岛 266590;

3. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092; 4. 中国矿业大学深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 江苏 徐州 221116)

摘要:介绍了黄河冲积平原地区某开挖范围为 271 m×192 m, 开挖深度为 18.7~19.5 m, 采用土钉、预应力锚索加钻孔灌注桩作为支护结构的超大型深基坑开挖现场监测实例, 研究了超大型深基坑开挖过程中围护结构变形、地表沉降、锚索轴力的变化规律。研究表明: 围护桩水平位移随开挖深度的增加而增大, 围护桩最大水平位移随开挖深度的增加逐渐向深部发展。基坑外纵向地表沉降大致呈马鞍形分布, 地表沉降最大值位于基坑中部附近, 基坑角部沉降约为基坑中部沉降的 33.9%, 纵向沉降影响范围大于基坑开挖范围。基坑分层开挖过程中锚索轴力随开挖深度的变化而动态调整, 下层锚索施工完成后, 上层锚索的锚固力先减小后缓慢增长并最终趋于稳定。锚索钻孔和高压注浆施工过程中对周围已有锚索的扰动影响不容忽视。

关键词:超大型深基坑; 支护结构; 监测; 水平位移; 地表沉降; 锚索轴力

中图分类号: TU473 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2014)S2-0471-08

作者简介: 徐 飞(1988-), 男, 博士研究生, 主要从事基坑工程, 隧道支护及地质灾害超前预报方面的研究。E-mail: sduxufly@163.com。

Monitoring analysis of super large and deep foundation pit in alluvial plain of Yellow River

XU Fei¹, WANG Wei-ming², ZHANG Qian-qing^{1, 3, 4}, LI Shu-cai¹, LI Li-ping¹, LIU Hong-liang¹, ZHANG Qian¹

(1. Research Center of Geotechnical and Structural Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China; 2. College of Civil

Engineering and Architecture, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266510, China; 3. Key Laboratory of

Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 4. State Key Laboratory

for GeoMechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: A foundation pit with excavation zone of 271 m×192 m and excavation depth of 18.7 m~19.5 m is monitored during excavation. The foundation pit is located in the alluvial plain of the Yellow River and supported by soil nailings, bored piles and prestressed anchor cables. Based on the monitoring results, the variation of deformation of retaining structures, ground settlement and anchor cable force are analyzed. It can be concluded that the horizontal displacement and the location of the maximum horizontal displacement of retaining piles increase with the increasing excavation depth. The longitudinal ground settlement has a saddle-shaped distribution. The maximum ground settlement appears in the middle zone of excavation, and the value of pit corner settlement is about 33.9% times that of the middle zone settlement in the longitudinal direction of pit. The longitudinal surface settlement trench is wider than the pit. Moreover, the value of the anchor cable force dynamically varies with the excavation depth. The value of the upper anchor first decreases, then slowly increases, and tends to be stable after the lower anchor is completed. The influences of the anchoring effect caused by drilling bore hole of anchor and high pressure grouting can not be ignored.

Key words: super large and deep foundation pit; supporting structure; monitoring; horizontal displacement; ground settlement; anchor cable force

0 引言

随着城市建设规模及地下空间开发规模的不断发展, 高层建筑和地下交通工程建设中面临大量深基坑开挖问题。由于岩土工程问题的复杂性和基坑工程问

基金项目: 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室开放基金项目 (KLE-TJGE-B1301); 中国矿业大学深部岩土力学与地下工程国家重点实验室开放基金项目 (SKLGDUEK1210); 中国博士后科学基金面上项目 (2012M521339); 中国博士后科学基金特别资助项目 (2014T70641)

收稿日期: 2014-07-28

*通讯作者

题的特殊性, 基坑安全事故时有发生。除加强基坑支护措施, 提高设计水平外, 基坑开挖过程中的现场监测是降低基坑施工过程风险的重要手段。同时, 对基坑监测数据进行相关研究可为动态调整支护参数提供有效依据。基坑开挖过程中现场监测是实现基坑动态设计开挖的必要途径。

目前, 国内外学者通过基坑现场监测数据对基坑变形特性进行了研究。蒋冲等^[1]以深圳平安金融中心基坑为研究背景, 结合基坑围护结构变形现场监测数据, 对施工过程中围护结构的水平变形随基坑开挖深度和时间的变化规律, 基坑开挖钢支撑轴力随时间的变化规律进行了分析。水伟厚等^[2]对上海浦东国际机场二期基坑工程的围护桩顶水平位移、坑外土体深层水平位移、锚拉钢筋受力等现场监测数据进行了分析。任永忠等^[3]以兰州市某深基坑工程为例, 探讨了深基坑中排桩预应力锚杆的设计要点, 对基坑开挖过程中桩顶及桩身位移的现场监测数据进行了分析。王源等^[4]根据基坑开挖过程中现场监测数据, 分析了南京长江隧道浦口深基坑开挖时土体沉降与水平位移、坑底隆起、地下水位、支护桩内力、支撑轴力和水土压力等变化规律。覃卫民等^[5]依托武汉团结小区商住楼工程基坑, 对周围构筑物及管线沉降、建筑物倾斜、基坑围护体及土体水平位移等进行了监测分析。高华东^[6]根据北京某地铁深基坑开挖监测实例, 开展了基坑开挖过程中现场监测点的设计, 监测仪器的布置方式, 开挖过程中监测频率及监测预警值的确定等研究工作。刘国彬等^[7], 孙凯等^[8], 安关峰等^[9]和周香莲等^[10]依托基坑开挖过程中的现场监测工作对深基坑变形特性进行了相关研究。

目前, 黄河冲积平原地区(如济南)超大型深基坑开挖施工过程中围护结构及周围地表等变形特性尚未有详细报道, 缺乏针对性的研究成果。该地区超大型深基坑的支护设计和施工存在较大的技术挑战。济南市位于泰山之北, 黄河之南, 处于鲁西南低丘平原、鲁西北黄泛平原和鲁中的山前冲积平原三者的过渡地带, 造成了济南市复杂多变的地质特征。本文依托黄河冲积平原地区某开挖范围为 $271\text{ m} \times 192\text{ m}$, 开挖深度为 $18.7\sim 19.5\text{ m}$, 采用土钉、预应力锚索加钻孔灌注桩作为支护结构的超大型深基坑开挖现场监测实例, 研究了超大型深基坑开挖过程中围护结构变形、地表沉降、锚索轴力的变化规律, 旨为该地区深基坑的开挖支护设计与施工提供有益的参考。

1 工程概况及地质条件

工程场地位于济南西部新城核心区中心发展轴与腊山河景观带的交汇处, 为大剧院、中心广场、配套

高层三部分组成的大型城市综合体, 总建筑面积约 $38 \times 10^4\text{ m}^2$ 。场地为黄河、小清河冲积平原的边缘相, 水文地质单元位于西郊玉符河隐伏冲积扇前缘砂、砾石富水区。场地地下水类型为第四系孔隙潜水, 主要由大气降水和地下、地表水渗流补给。场地地下水位为 $4.1\sim 5.6\text{ m}$, 地下水位季节性变化幅度 2 m 左右。钻探揭示地层上部为黄河、小清河冲积成因的黏性土、粉土等, 下部为山前冲洪积成因的黏性土、砂土、卵石土。地基土层主要物理力学性质指标见表1。

表 1 基坑支护岩土体物理力学参数
Table 1 Physical and mechanical parameters of geo-materials

序号	土层名称	重度 γ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	抗剪强度指标		地基承载力特征值 /kPa
			黏聚力 c/kPa	内摩擦角 φ /(°)	
①	素填土	18.5	10	15	—
②	粉质黏土	18.5	12.7	19.2	120
③	粉土	19.6	24.6	28.2	130
④	粉质黏土	19.8	22.3	16.3	140
④ ₁	粗砂	18.5	0.0	35.0	180
⑤	粉质黏土	18.5	24.1	19.2	180
⑤ ₁	中砂	20.0	0.0	35.0	200
⑥	粉质黏土	19.3	24.1	19.2	200
⑥ ₁	黏土	19.7	44.3	16.9	240
⑦	粉质黏土	19.2	33.3	23.2	220

基坑周围环境极其复杂, 场区北侧距基坑开槽线约 12 m 为规划济西东路, 南侧隔地铁^{#1}线与大剧院施工区域相接, 东侧为施工临时便道, 西侧距离腊山河的最近距离约为 66 m 。该基坑属于超大型深基坑。基坑开挖范围 $271\text{ m} \times 192\text{ m}$, 开挖面积 $5.2 \times 10^4\text{ m}^2$, 开挖深度为 $18.7\sim 19.5\text{ m}$ 。基坑平面布置图和基坑开挖现场照片见图1, 2, 其中图1中虚线框范围为本基坑位置。

2 基坑支护结构及施工工况

2.1 基坑支护结构

本基坑开挖范围 $271\text{ m} \times 192\text{ m}$, 开挖深度为 $18.7\sim 19.5\text{ m}$, 属超大型深基坑(一级基坑)。综合考虑基坑周围环境和场地土质条件及施工条件, 采用如下支护结构: 基坑上部 7.2 m 按照 $1:0.8$ 放坡开挖, 并采用三排土钉支护, 基坑开挖表面喷射厚约 80 mm 的C20混凝土面层, 并配以 $\Phi 6.5\text{ mm} @ 200\text{ mm} \times 200\text{ mm}$ 的钢筋网片。

基坑 7.2 m 以下范围采用一桩一锚加锁扣的支护方式, 围护桩顶部采用 $1\text{ m} \times 0.8\text{ m}$ 的压顶冠梁来提高支护结构的整体稳定性。围护桩长度为 22.3 m , 直径为 0.8 m , 桩间距为 1.5 m , 3道预应力锚索的长度分别为 $25, 28, 25\text{ m}$, 施加预应力分别为 $150, 200, 180\text{ kN}$ 。基坑典型支护剖面和现场照片如图3,

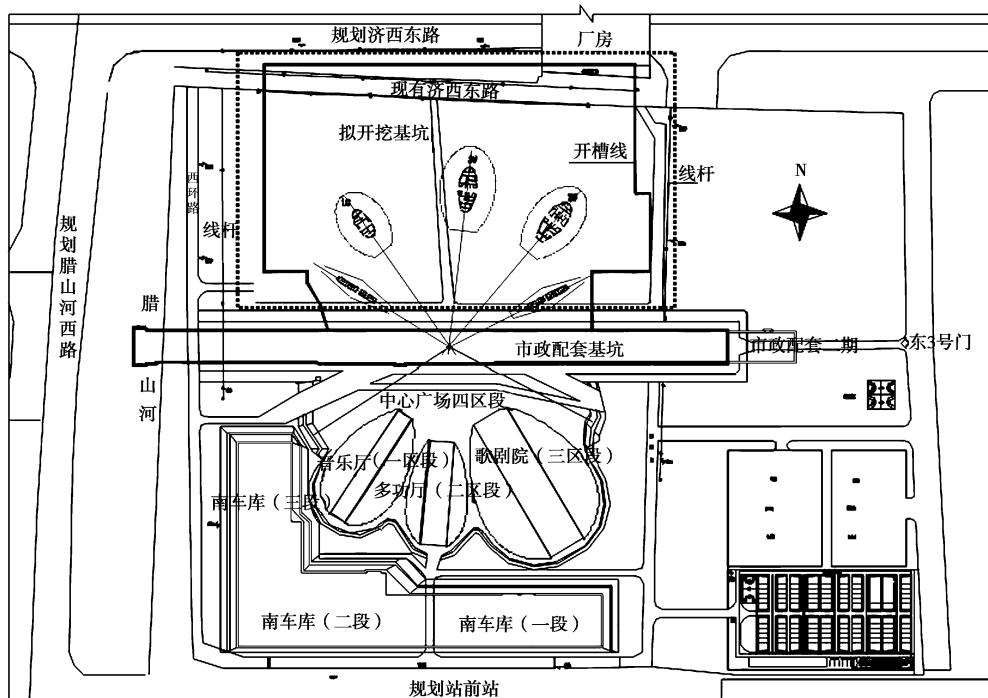


图 1 基坑平面图

Fig. 1 Layout of excavation



(a) 基坑北侧和东侧

(b) 基坑南侧

图 2 基坑现场照片

Fig. 2 Photos of excavation

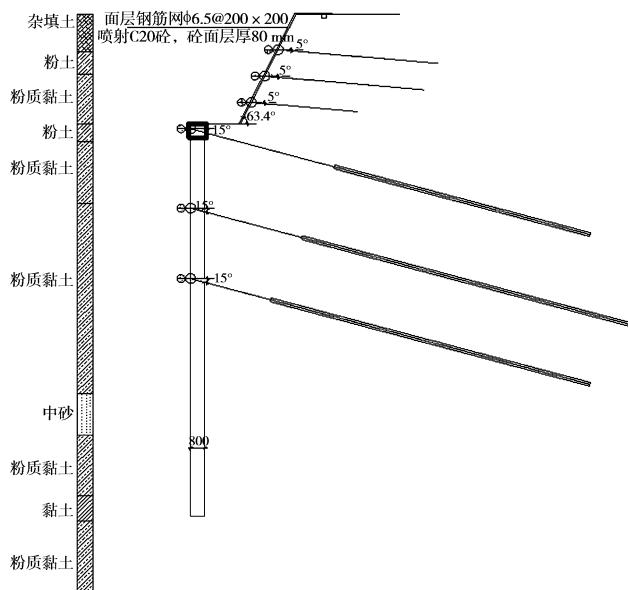


图 3 典型支护剖面图

Fig. 3 Typical cross section of excavation



图 4 第三道锚索施工前现场照片

Fig. 4 Photo of construction field before third anchor cable



图 5 止水帷幕施工现场照片

Fig. 5 Photo of construction of waterproof curtain

4 所示。在基坑的东、西、北三侧, 距基础外墙线约 12~30 m 设置高压旋喷桩止水帷幕, 帷幕的施工过程如图 5 所示。坑内外采用降疏水配合集水明排措施抽排地下水。

2.2 施工工况

综合考虑基坑周围环境, 场地土质条件, 施工条件和支护结构形式, 采取以下五步工况进行开挖:

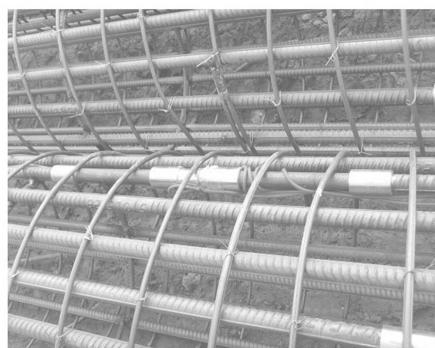
- (1) 按照1:0.8放坡开挖并施工土钉墙, 开挖至-7.2 m处。
- (2) 施工钻孔灌注桩以及冠梁, 施加第一道预应力锚索, 开挖至-11 m处。
- (3) 开挖直墙段, 施加第二道预应力锚索, 开挖至-15 m处。
- (4) 继续开挖直墙段, 施加第三道预应力锚索, 开挖至设计标高。
- (5) 浇筑大底板。

3 监测项目及测点布置

为监测基坑施工过程中围护结构和周围环境的变化情况, 结合工程施工特点及一级基坑变形控制要求设置以下监测内容: 围护桩水平位移监测, 地面沉降监测, 预应力锚索轴力监测, 坑内外水位, 土压力和钢筋应力等。采用安装在钢筋笼内的测斜管监测围护桩水平位移, 测斜管仪器编号为CX1~CX11; 地面沉降监测点共设置33个, 编号为PCJ1~PCJ33; 预应力锚索轴力监测时共布置锚索轴力监测点33个, 编号为MS1-(1-3)~MS11-(1-3); 采用孔隙水压力计进行坑内外水位监测; 采用土压力盒进行土压力监测; 采用钢筋应力计进行钢筋应力监测。部分监测元件现场安装见图6, 监测点布置见图7。



(a) 土压力盒安装



(b) 钢筋应力计安装



(c) 测斜管安装



(d) 钢筋笼吊装

图 6 部分监测元件现场安装照片

Fig. 6 Photos of installation of partial monitoring elements

4 基坑现场开挖监测结果分析

4.1 围护桩水平位移

不同施工工况下基坑西侧、北侧和东侧围护桩水平位移随开挖深度的变化曲线见图8。

由图8可知, 不同施工工况下围护桩水平位移随深度分布曲线由近似三角形向“鼓肚”形变化, 施工工况(3)和施工工况(4)时围护桩水平位移曲线外凸曲率增量明显偏大。随着开挖深度的增加, 围护桩最大水平位移的位置逐渐向深度范围发展。由此可知, 加强基坑开挖深度范围内中下部位置处的支护强度(如布设腰梁、局部注浆及施作预应力锚索等措施)可减小围护桩的最大水平位移, 提高基坑的稳定性。施工工况(4)结束至施工工况(5)底板浇筑期间围护桩的水平位移仍有增加, 这可能是土体的蠕变所致。这与应宏伟等^[11]对软土地区基坑开挖的现场监测结果类似。因此, 基坑开挖至设计标高时应尽量减少坑底的裸露时间, 及时浇筑底板。该超大型深基坑开挖过程现场监测数据图8(a)表明, 测斜管CX2最大位移值超过80 mm(约为0.65%H₀, H₀为围护桩支护深度), 土体蠕变效应较显著, 约占围护桩总水平位移的12%。这可能是测斜管CX2紧邻腊山河(见图7), 受土体渗流影响较显著的原因。

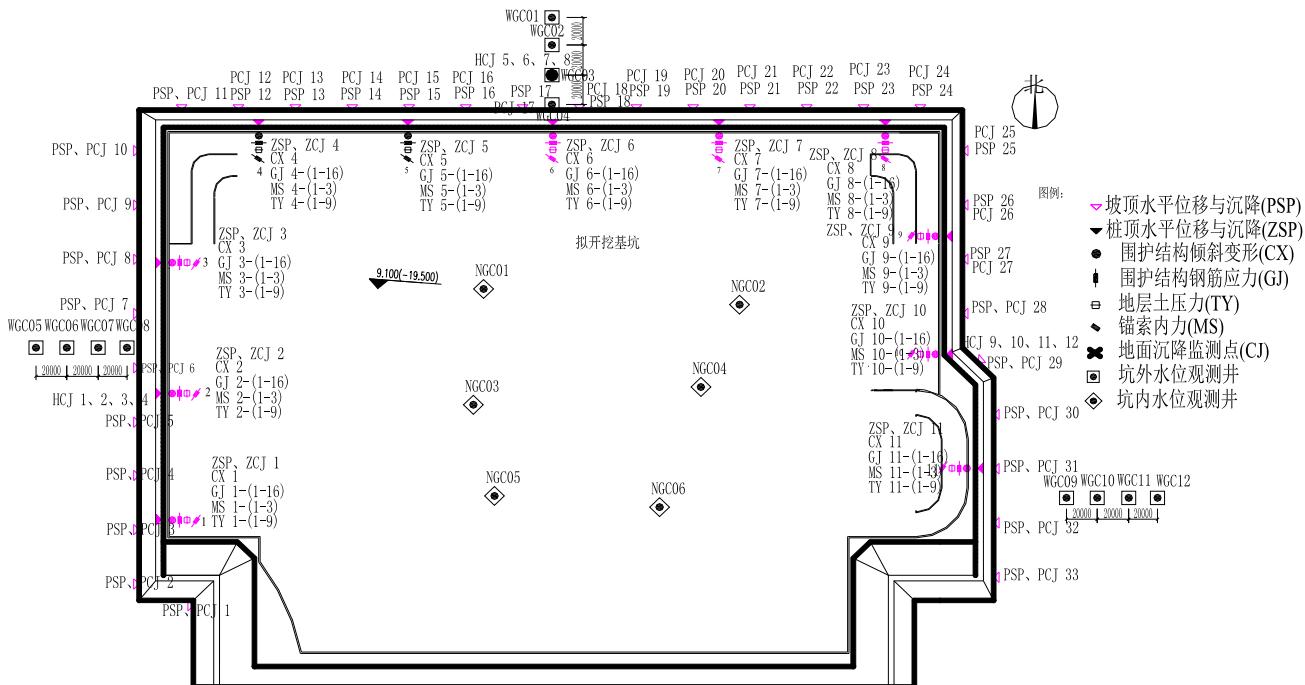


图 7 基坑监测点布置示意图

Fig. 7 Layout of monitoring points

图 8 (b) 中测斜管 CX6 最大值达 96 mm (约 $0.77\%H_0$), 土体蠕变效应显著, 约占围护桩总水平位移的 18%。由图 7 可知, 测斜管 CX6 位于基坑北侧中部且紧邻济西东路, 该道路为施工期间混凝土运输罐车、公交车等交通主干道, 车辆动荷载会加重土体的蠕变效应。

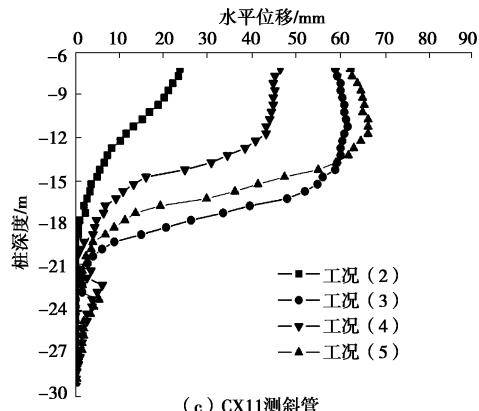
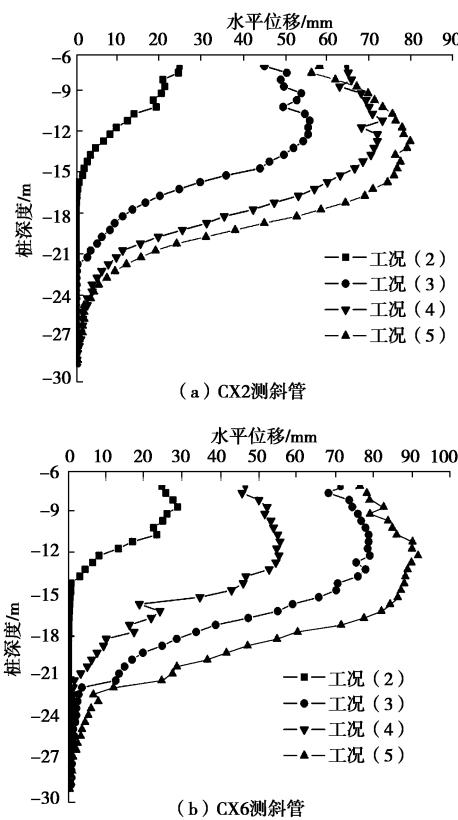


图 8 测斜管各工况水平位移观测结果

Fig. 8 Observed horizontal deformations of inclinometers

由图 7 可知, 图 8 (c) 中测斜管 CX11 位于基坑东侧偏南, 受外荷载扰动较小, 在浇筑底板期间上半部分土体未发生明显的蠕变, 反而出现了回移现象。基坑已开挖到设计标高, 土体荷载充分释放, 基坑下半部分土体产生了蠕变变形。实际施工过程中, 应尽量缩短底板施工工期, 若底板施工工期过长, 建议在基坑底部设置斜撑或采取抽条加固^[12]等措施, 以保证坑壁稳定。

参考 Mana 等^[13]提出的墙体无量纲化最大水平位移与基坑抗隆起安全系数关系曲线, 依托文献[13]中奥斯陆地区、芝加哥、旧金山以及本文基坑 CX2, CX6 和 CX11 测斜管获得的围护桩最大水平位移与抗隆起安全系数的对应数据点, 可获得本基坑墙体最大水平位移与抗隆起安全系数的关系, 如图 9 所示。图 9 中

抗隆起系数可利用太沙基理论公式求得。

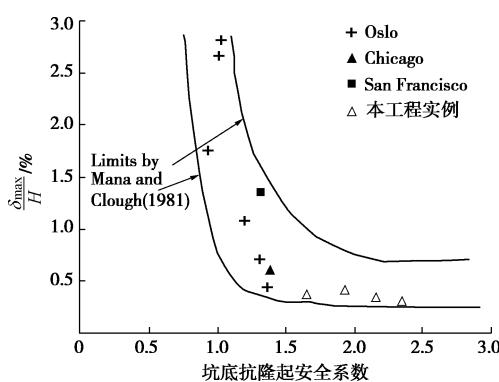


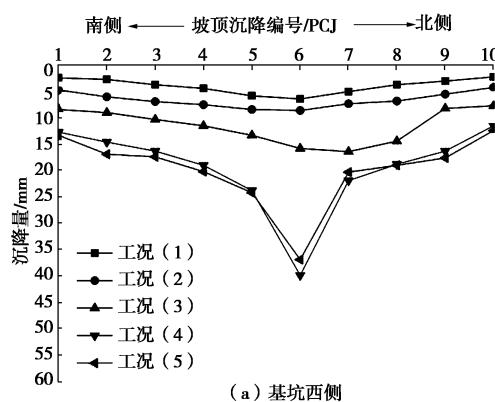
图 9 墙体最大水平位移与抗隆起安全系数的关系

Fig. 9 Relationship between maximum wall deflection and factor of safety against base heave

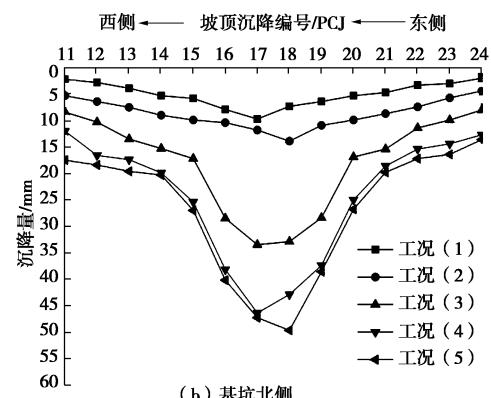
由图 9 可知, 本基坑墙体最大水平位移与抗隆起安全系数关系的数据点位于文献[13]中提出的墙底自由和墙底固定的两条边界线范围内, 抗隆起安全系数与墙体位移呈反比。Mana 等^[13]建议的由基坑抗隆起系数预估墙体最大水平位移的方法同样适用于黄河冲积平原地区济南市的超大型深基坑。

4.2 地表沉降

不同施工工况下基坑西侧和北侧地表纵向沉降变化特性见图 10。



(a) 基坑西侧



(b) 基坑北侧

Fig. 10 Longitudinal ground settlement

由图 10 可知, 基坑西侧和北侧地表纵向沉降大致呈马鞍形, 地表纵向沉降最大值位于基坑中部附近, 基坑角部沉降约为基坑中部沉降的 33.9%。由基坑角部测点实测数据可知地表纵向沉降影响范围大于基坑开挖范围。施工至工况(3)和工况(4)时地表纵向沉降增幅最大。工况(5)施工期间坡顶沉降继续发展, 这可能是由于渗流、扰动荷载作用下土体蠕变变形所致。因此, 基坑开挖过程中为保证基坑周围环境安全, 应采取一定措施控制基坑外的纵向不均匀沉降。

Mana 等^[13]提出了围护墙体最大水平位移 δ_{hmax} 与地表最大沉降 δ_{vmax} 间的关系(即 δ_{hmax} 与 δ_{vmax} 位于 $\delta_{vmax}=0.5\delta_{hmax}$ 和 $\delta_{vmax}=\delta_{hmax}$ 两条直线间范围), 如图 11 所示。由图 8, 10 中实测数据可知 δ_{hmax} 与 δ_{vmax} 间关系满足 $\delta_{vmax}=0.45\delta_{hmax}$ 和 $\delta_{vmax}=0.56\delta_{hmax}$ (图 11)。可见 Mana 等^[13]提出的关系式并不完全适用于黄河冲积平原地区基坑围护墙体最大水平位移 δ_{hmax} 与地表最大沉降 δ_{vmax} 间关系的预估。

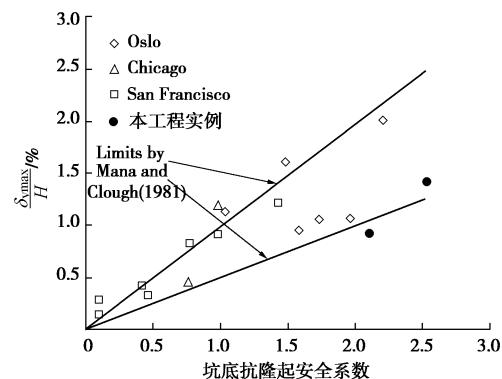
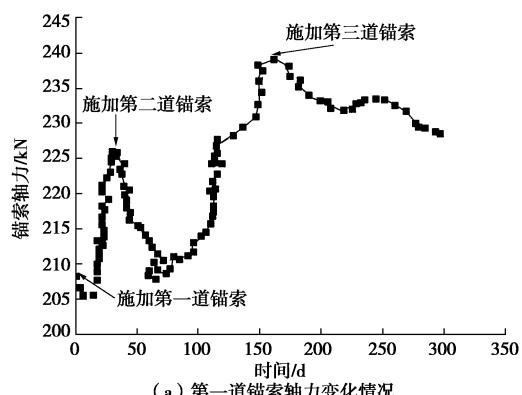


图 11 墙体最大水平位移与地表最大沉降的关系

Fig. 11 Relationship between maximum ground settlement and maximum wall deflection

4.3 锚索轴力

以 6 号桩对应的三道锚索为例, 采用 0.9~1.0 倍设计值对锚索进行分级张拉, 获得了锚索轴力随时间(施工工况)的变化规律, 见图 12。



(a) 第一道锚索轴力变化情况

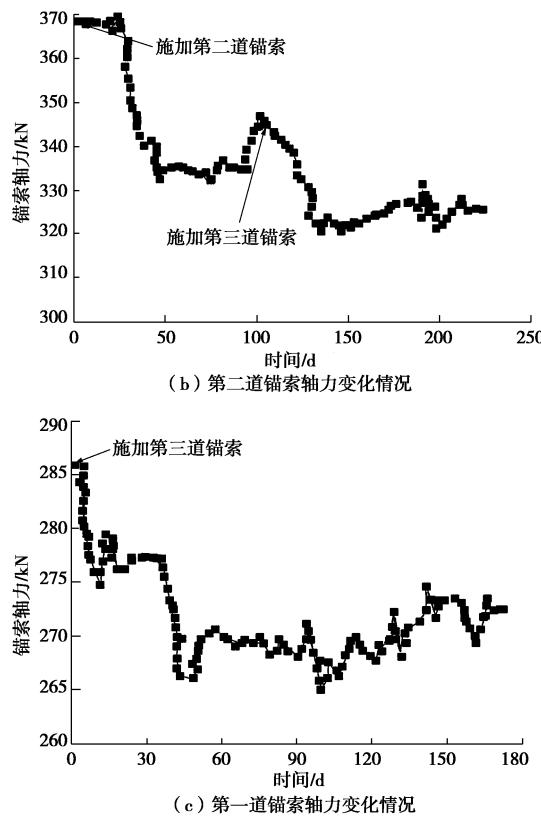


图 12 锚索锚固力变化情况

Fig. 12 Variation of anchorage force of anchor cables

由图 12 (a) 可知, 第一道锚索锁定后, 施工至工况 (3) 前, 锚索锚固力出现一定的损失, 估计是由于钢绞线回缩、锚梁下土体固结等原因所致。随着施工工况 (3) 的推进, 坑外土体有向基坑内移动的趋势, 这会造成基坑支护结构水平位移的逐渐增大, 继而引起锚索轴力逐渐增大。基坑支护结构水平位移和锚索轴力的变化趋势一致。第二道锚索钻孔注浆施工时第一道锚索轴力突然增加, 可能是由于锚索施工过程中钻孔扰动、高压注浆加固等影响所致。因此, 基坑不同开挖深度处锚索施工时应加强周围邻近锚索轴力动态监测, 防止因施工扰动导致锚索轴力突降出现坑壁滑塌等工程事故的发生。第二道锚索预应力的施加会造成第一道锚索的轴力突然下降, 随着开挖深度的增加其锚索轴力缓慢增长并趋于稳定。第三道锚索的施工对第一道锚索轴力的影响与第二道锚索施加时对第一道锚索轴力的影响规律类似, 但其影响程度较小。图 12 (b) 表明, 工况 (4) 实施过程中第二道锚索轴力变化规律与第一道锚索轴力的变形规律相似。若忽略周围锚索钻孔施工扰动及高压注浆影响, 锚索轴力的变化可概括为 3 个阶段: 预应力损失阶段、缓慢上升阶段、基本稳定阶段, 如图 12 (c) 所示。

5 结 论

依托黄河冲积平原地区某开挖范围为 271

$m \times 192 m$, 开挖深度为 $18.7 \sim 19.5 m$, 采用土钉、预应力锚索加钻孔灌注桩作为支护结构的超大型深基坑开挖现场监测实例, 研究了超大型深基坑开挖过程中围护结构变形、地表沉降、锚索轴力的变化规律, 得到如下结论:

(1) 该基坑最大水平位移约 $96 mm$, 约为围护桩有效支护深度的 0.77% , 基础底板施工期间基坑的蠕变变形约占支护结构总水平变形的 $12\% \sim 18\%$ 。道路车辆的动荷载和土体渗流引起的土体蠕变对黄河冲积平原地区超大型深基坑支护结构水平变形的影响不容忽视。实际施工过程中, 应尽量缩短底板施工工期, 若底板施工工期过长, 可在基坑底部设置斜撑或采取抽条加固等措施来保证坑壁稳定。Mana 等建议的由基坑抗隆起系数预估墙体最大水平位移的方法适用于黄河冲积平原地区济南市的超大型深基坑。

(2) 基坑地表纵向沉降大致呈马鞍形, 地表纵向沉降最大值位于基坑中部附近, 基坑角部沉降约为基坑中部沉降的 33.9% 。基坑最大地表沉降 δ_{vmax} 与支护结构的最大水平位移 δ_{hmax} 满足 $\delta_{vmax}=0.45\delta_{hmax}$ 和 $\delta_{vmax}=0.56\delta_{hmax}$ 。

(3) 下一道锚索施工时上一道锚索轴力突然增加, 可能是由于锚索施工过程中钻孔扰动、高压注浆加固等影响所致。因此, 基坑不同开挖深度处锚索施工时应加强周围邻近锚索轴力动态监测, 防止因施工扰动导致锚索轴力突降出现坑壁滑塌等工程事故的发生。

参考文献:

- [1] 蒋 冲, 周科平, 胡毅夫. 深圳平安金融中心基坑围护结构变形监测分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(增刊 1): 3383 - 3389. (JIANG Chong, ZHOU Ke-ping, HU Yi-fu. Deformation monitoring and analysis of retaining structure in foundation pit of Ping'an financial center in Shenzhen[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(S1): 3483 - 3489. (in Chinese))
- [2] 水伟厚, 李 广, 李国章, 等. 上海浦东国际机场二期登机长廊基坑监测分析[J]. 岩土工程学报, 2007, 28(增刊 1): 1819 - 1822. (SHUI Wei-hou, LI Guang, LI Guo-zhang, et al. Excavation monitoring of Shanghai Pudong International Airport[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(S1): 1819 - 1822. (in Chinese))
- [3] 任永忠, 朱彦鹏, 周 勇. 兰州市某深基坑支护设计及监测研究分析[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(增刊 1): 705 - 710. (REN Yong-zhong, ZHU Yan-peng, ZHOU Yong. Design and monitoring of bracings for a deep foundation pit in

- Lanzhou[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(S1): 705 – 710. (in Chinese))
- [4] 王 源, 刘松玉, 谭跃虎, 等. 南京长江隧道浦口深基坑信息化施工与分析[J]. 岩土工程学报, 2009, **31**(11): 1784 – 1791. (WANG Yuan, LIU Song-yu, TAN Yue-hu, et al. Analysis and information construction of Pukou deep foundation pit of Nanjing Yangtze River tunnel[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, **31**(11): 1784 – 1791. (in Chinese))
- [5] 覃卫民, 张照仪, 王 浩, 等. 武汉团结小区商住楼工程基坑施工监测分析[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(增刊 1): 1830 – 1833. (QIN Wei-min, ZHANG Zhao-yi, WANG Hao, et al. Analysis of excavation monitoring for Tuanjie building in Wuhan[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(S1): 1830 – 1833. (in Chinese))
- [6] 高华东. 北京某深基坑开挖监测实例[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(增刊 1): 1853 – 1857. (GAO Hua-dong. Monitoring of a deep excavation in Beijing[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(S1): 1853 – 1857. (in Chinese))
- [7] 刘国彬, 刘登攀, 刘丽雯, 等. 基坑坑底施工阶段围护墙变形监测分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, **26**(增刊 2): 4386 – 4394. (LIU Guo-bin, LIU Deng-pan, LIU Li-wen, et al. Monitoring and analysis of lateral deformation of retaining wall during bottom excavation in deep pit[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, **26**(S2): 4386 – 4394. (in Chinese))
- [8] 孙 凯, 许振刚, 刘庭金, 等. 深基坑的施工监测及其数值模拟分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, **23**(2): 293 – 298. (SUN Kai, XU Zhen-gang, LIU Ting-jin, et al. Construction monitoring and numerical simulation foundation of a analysis pit[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, **23**(2): 293 – 298. (in Chinese))
- [9] 安关峰, 宋二祥. 广州地铁琶州塔站工程基坑监测分析[J]. 岩土工程学报, 2005, **27**(3): 333 – 337. (AN Guan-feng, SONG Er-xiang. The analysis of excavation monitoring for the Pazhouta subway station in Guangzhou[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, **27**(3): 333 – 337. (in Chinese))
- [10] 周香莲, 王建华, 黄 鑫. 宁波北仑电厂二期循环水泵房基坑支护与监测[J]. 岩土力学, 2002, **23**(1): 120 – 123. (ZHOU Xiang-lian, WANG Jian-hua, HUANG Xin. Supporting and monitoring deep excavation of the phase II pump-station of circulation water of Beilun in Ningbo[J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, **23**(1): 120 – 123. (in Chinese))
- [11] 应宏伟, 杨永文. 杭州深厚软黏土中某深大基坑的性状研究[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(12): 1838 – 1846. (YING Hong-wei, YANG Yong-wen. Characteristics of a large and deep soft clay excavation in Hangzhou[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(12): 1838 – 1846. (in Chinese))
- [12] 郑俊杰, 章荣军, 丁烈云, 等. 基坑被动区加固的位移控制效果及参数分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, **29**(5): 1042 – 1051. (ZHENG Jun-jie, ZHANG Rong-jun, DING Lie-yun, et al. Displacement control effects and parameter analysis of passive zone improvement of foundation pits[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, **29**(5): 1042 – 1051. (in Chinese))
- [13] MANA A I, CLOUGH G W. Prediction of movements for braced cuts in clay[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1981, **107**(6): 759 – 777.

(本文责编 胡海霞)