

DOI: 10.11779/CJGE2016S2022

# 坑底加固置换率对杭州地铁湘湖站深基坑安全的影响分析

刘雪珠<sup>1</sup>, 张艳书<sup>2</sup>, 顾蒙蒙<sup>2</sup>, 庄海洋<sup>\*2</sup>

(1. 江苏省岩土工程公司, 江苏 南京 210009; 2. 南京工业大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210009)

**摘 要:** 针对杭州地铁 1 号线湘湖站北二基坑的坍塌事故, 建立了基坑开挖全过程模拟的三维有限元分析模型, 分析了坑底加固置换率对该深基坑侧向位移、地连墙弯矩和内支撑轴力的影响规律, 并把计算结果与该基坑坍塌事故现象进行了对比分析。结果表明: 当置换率小于 60% 时, 其对该深基坑的水平侧移和弯矩都有较大的影响, 当置换率大于 60% 时这种影响明显变小; 置换率对内支撑轴力的影响主要体现在对底层内支撑的影响最大, 而对其他内支撑轴力的影响基本一致。通过与该基坑坍塌事故的对比, 可以发现置换率对地连墙弯矩的主要影响范围正与本次事故地连墙的折断位置相吻合, 且该基坑已加固区的围护结构没有坍塌这一现象也再次证明基坑底部加固对该基坑安全起着重要的作用。

**关键词:** 地铁车站; 深基坑; 地基加固; 坍塌; 有限元分析

**中图分类号:** TU43

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-4548(2016)S2-0136-07

**作者简介:** 刘雪珠(1970-), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事岩土工程设计、施工研究。E-mail: 1792960738@qq.com。

## Effects of reinforcement replacement rates at pit bottom on safety of deep foundation pit of Xianghu metro subway station in Hangzhou

LIU Xue-zhu<sup>1</sup>, ZHANG Yan-shu<sup>2</sup>, GU Meng-na<sup>2</sup>, ZHUANG Hai-yang<sup>2</sup>

(1. Geo-technical Engineering Company of Jiangsu Province, Nanjing 210009, China; 2. Institute of Geotechnical Engineering, Nanjing Technology University, Nanjing 210009, China)

**Abstract:** For the collapse accident of the second foundation pit at the north side of Xianghu station of Hangzhou metro line No. 1, a three-dimensional finite element model is established to simulate the whole excavation process of the deep foundation pit. Then, the effects of different reinforcement replacement rates at the bottom of pit on the safety of deep foundation pit of Xianghu station are analyzed. The results show that the reinforcement replacement rate has great influence on the lateral displacement and the moment of the diaphragm wall of the deep foundation pit when the replacement ratio is less than 60%. However, as the replacement ratio is greater than 60%, this kind of effect decrease obviously. The axial force on the inner support is also influenced obviously by the replacement ratio, which mainly shows that it has the maximum effect on the lowest inner support. By contrast with the collapse accident of the pit of Xianghu subway station, it is found that the major impact area of the moment of the diaphragm wall generated by different replacement ratios is consistent with the broken position of the diaphragm wall in the collapse accident. However, the retaining structures have no collapse when the bottom ground is reinforced, which proves again that the reinforced bottom of foundation pit plays a significant role in this accident.

**Key words:** subway station; deep foundation pit; foundation reinforcement; collapse; finite element analysis

## 0 引 言

随着城市现代化进程的加快, 人们对交通便利性提出了更高的要求, 地铁作为一种便利快捷的交通工具, 深受大众喜爱。近年来, 各城市地铁数量不断增加, 地铁系统在建设期间, 屡屡发生安全事故并造成重大的生命财产损失。2008 年 11 月 15 日下午 15 点

15 分左右, 杭州地铁 1 号线湘湖站北二基坑发生坍塌事故, 基坑西侧萧山风情大道约 75 m 的路面坍塌,

基金项目: 江苏省地质矿产勘查局科研项目 (2013-科研-13); 中国博士后基金项目 (2014M551909)

收稿日期: 2016-05-19

\*通讯作者 (E-mail: zhuang7802@163.com)

道路下的排污、供水、供电设施受到破坏, 并造成 21 人死亡, 事故的严重后果再一次给人们敲响了警钟, 工程界和学术界都希望从这次惨痛的经历中吸取经验教训<sup>[1-3]</sup>。

而以往的研究表明深基坑坑底加固对基坑的整体安全将会产生较大的影响。例如, 夏建中等<sup>[4]</sup>以弹性地基梁法为基础建立了基坑的二维有限元分析模型, 分析了基坑内土体的加固深度和程度对表沉降的影响; 姚燕明等<sup>[5]</sup>采用弹性地基上的板壳有限元, 分析了坑底土体加固的深度、加固的密度、加固的程度对基坑变形的影响; 朱志祥等<sup>[6]</sup>采用有限差分软件 FLAC<sup>3D</sup> 建立某地铁车站深基坑的数值计算模型, 并对未加固和加固两种设计方案进行了施工全过程数值模拟, 对两种方案的土压力、地下连续墙水平位移以及邻近铁路路堤沉降的模拟计算结果进行了对比分析; 蒋建平<sup>[7]</sup>基于平面数值模拟方法对坑底加固体的刚度效应进行了探讨; 黄宏伟等<sup>[8]</sup>针对上海市黄浦江行人隧道浦东竖井的基坑开挖, 对坑内降水和加固的效果以及墙体侧向位移进行了分析, 讨论了不同加固方法对改善和提高坑内土体力学参数的效果, 及对墙体位移的影响。

为了探明坑底加固对杭州地铁湘湖站北二基坑事故的影响, 本文采用有限元软件 midas/GTS 对不同坑底加固置换率条件下该基坑围护体系的主要变形特征和内力反应进行了三维数值模拟分析。给出了坑底加固置换率对基坑侧向位移、地连墙弯矩和内支撑轴力的影响规律。并通过与该基坑坍塌事故的破坏现象的对比, 验证了坑底加固对此类软土地区的狭长型深基坑安全的重要性和有效性。

## 1 湘湖站基坑工程概况

湘湖站属于杭州地铁 1 号线的起始站, 位于萧山湘湖杭州乐园二期的北侧, 风情大道与湘西路交叉路口北侧, 沿风情大道呈南北向, 地处于城乡结合部, 紧邻湘湖旅游度假区和萧山城区。湘湖站建成后为二层岛式车站, 总长约为 934.5 m, 车站宽约为 21 m, 车站采用明挖法施工, 整个基坑工程有 8 个基坑, 从北到南序号分别为北一、北二(发生坍塌事故)、北三、北四、南四、南三、南二、南一。

2008 年 11 月 15 日 15 点 15 分左右, 北二基坑发生坍塌, 基坑主体部分地连墙与端头井地连墙联结处被撕扯开, 西侧墙体向基坑内移动最大距离达 7 m, 且基坑主体西侧地连墙上部约 1/3 处折断; 东侧地连墙没有折断, 向基坑内倾斜约 3.9 m。至事故发生前, 11 月 5 日基坑第一施工段完成混凝土底板的浇筑, 11

月 13 日, 第二施工段完成混凝土底板垫层的浇筑, 第三施工段完成所有的土方开挖以及内支撑安装, 第四施工段开始安装第四道支撑, 第五、六施工段正在开挖最后一层土。

基坑西侧墙体断裂后, 大量淤泥涌入坑内, 风情大道随后出现塌陷, 正在等红灯的十几辆车整体下沉, 最终大道塌陷最大深度约为 6.5 m, 宽 40 m, 长约百米。同时地面塌陷导致地下污水等管道破裂, 河水倒灌造成基坑和地面塌陷处进水, 路面上车辆浸水, 基坑内最大水深约为 9 m, 基坑主体内支撑全部失效, 中间立柱全部向东侧墙体平移或倾斜, 最大平移距离约为 7 m, 此次基坑事故导致 17 名施工工人死亡, 4 人失踪。

## 2 三维数值计算模型建立

### 2.1 几何模型及其边界条件

文数值模型按杭州湘湖站北 2 基坑建模, 根据以往的工程经验以及有限元计算结果, 基坑开挖的影响宽度约为开挖深度的 3~4 倍, 影响深度约为挖深的 2~4 倍。因此, 本模型开挖影响宽度约取开挖深度的 3.2 倍, 开挖影响深度约取开挖深度的 3 倍, 以充分考虑位移边界的影响。由于北 2 基坑形状较规则, 北端头井处突出较小, 整个基坑形状近似矩形, 所以为方便建模计算, 有限元建模时将北 2 基坑简化为矩形, 基坑尺寸约为 21 m×107 m, 挖深约为 15.7 m, 土层边界的宽度为 121 m, 长度为 207 m, 地下连续墙嵌入至 33 m。假定位移边界条件如下: 模型左右边界为单约束边界, 即水平向为位移限制边界, 竖向为自由移动边界; 底部为约束所有方向的自由度, 即采用全约束。地面超载布置在距离基坑边缘 6 m 处模拟车辆以及机械等对基坑的影响。

### 2.2 模型材料计算参数

土体本构模型采用摩尔库伦模型, 设计工况中采用水泥搅拌桩对坑底进行加固, 由于加固后土体性质发生了较大的变化, 常规的试验方法不能获得其强度计算参数。黄绍铭等<sup>[9]</sup>提出水泥土的割线模量与无侧限抗压强度之间的关系大致呈正比:

$$E_{50}^{\text{ref}} = 126q_u, \quad (1)$$

$$E_{\text{sp}} = mE_p + (1-m)E_s. \quad (2)$$

抽条加固方式按强度等效方法等效为块状加固, 加固后地基模量、泊松比、重度可以按照不同地基置换率对应的均匀复合土体进行计算。

水泥土的无限抗压强度为 1.0 MPa, 根据式 (1) 可知水泥搅拌桩的  $E_{50}^{\text{ref}}$  为 126 MPa, 张雪娟在其博士学位文<sup>[10]</sup>中指出桩体的压缩模量可近似取  $E_{50}^{\text{ref}}$  的一半,



表 1 天然地基土层的物理力学参数

Table 1 Parameters of natural soils

层序	土层名称	层厚 <i>h</i> /m	泊松比	重度 $\gamma$ /(kN·m <sup>-3</sup> )	黏聚力 <i>c</i> /kPa	内摩擦 角/(°)	弹性模量 /MPa	渗透 系数
1-2	素填土	1.5	0.20	18.0	10.0	10.0	4.5	$1.04\times 10^{-4}$
2-2	黏质粉土	5.6	0.35	19.0	10.2	31.8	21.0	$1.75\times 10^{-4}$
4-2	淤泥质黏土	12.0	0.40	17.7	10.0	4.7	15.0	$4.29\times 10^{-7}$
6-1	淤泥质粉质黏土	16.0	0.33	16.9	17.3	12.6	21.0	$4.00\times 10^{-7}$
8-2	粉质黏土夹粉砂	15.0	0.30	18.5	24.0	15.1	25.2	$4.00\times 10^{-4}$

表 2 复合土的物理力学参数

Table 2 Parameters of artificial composite soils

复合土（置换率）	层厚 <i>h</i> /m	泊松比	重度 $\gamma$ /(kN·m <sup>-3</sup> )	黏聚力 <i>c</i> /kPa	内摩擦 角/(°)	弹性模量 /MPa	渗透 系数
复合土（0.1）	3	0.35	17.9	14	8.2	37.8	—
复合土（0.2）	3	0.36	18.2	18	11.8	54.6	—
复合土（0.3）	3	0.39	18.4	22	15.3	71.4	—
复合土（0.6）	3	0.43	19.1	34	25.9	121.8	—
复合土（1.0）	3	0.49	20.0	50	40.0	189.0	—

表 3 围护结构参数表

Table 3 Parameters of enclosure structures

名称	材料	截面/m <sup>2</sup> 厚度/m	泊松比	重度 $\gamma$ /(kN·m <sup>-3</sup> )	弹性模量/GPa
地下连续墙	C30	1	0.20	24.0	30
混凝土支撑	C30	0.8×0.8	0.20	24.0	30
钢管支撑	Q235-B	φ 609×16	0.26	78.5	200
立柱	C30	φ 800	0.20	24.0	30

约 63 MPa，并按式（2）分别计算出面积置换率分别为 0.1，0.2，0.3，0.6 和 1 情况下复合土的压缩模量，再根据徐中华在其博士论文<sup>[11]</sup>中提出的弹性模量取为压缩模量的 3 倍的经验关系得到复合土的弹性模量。水泥土的黏聚力和内摩擦角参考黄绍铭的软土地基与地下工程<sup>[9]</sup>，土体的其他参数可从勘察报告中获取，具体数值查看表 1。不同置换率对应的复合土体的物理力学参数见表 2。

地下连续墙的模拟可以采用实体单元或是板单元。但如果采用实体单元，一方面会增加单元数量，另一方面其弯矩须通过单元积分点的应力计算得出，若采用板单元会更加精确，所以本文地下连续墙采用板单元进行模拟，基坑内支撑和立柱采用梁单元模拟，三者的材料均为采用弹性模型来模拟它们的力学特性。在建模中地连墙与土体单元之间用 Goodman 界面单元模拟其接触关系，接触面的力学参数为法向刚度 10 GPa/m、切向刚度 6 MPa/m、黏聚力为 50 kPa 和内摩擦角为 20°。

地下连续墙、混凝土支撑和立柱采用 C30 混凝土，

混凝土支撑截面为 0.8 m×0.8 m，钢管支撑外径 609 mm，壁厚 16 mm，采用 Q235-B 钢材，内支撑间距约为 3m，并施加预压力，从第一道支撑开始施加的预压力依次为 200，400，600，600 kN。设计工况中地连墙、立柱和支撑的输入参数值如表 3 所示。

2.3 基坑开挖工序的模拟

基坑开挖步骤对基坑安全至关重要，为了尽可能缩短基坑的无撑暴露时间并加快开挖速度，有效控制围护结构变形与坑外地面沉降，湘湖站北 2 基坑模型数值模拟施工阶段以实际工程步骤为指导，采用分层分段阶梯型开挖方式。基坑分五层开挖，每层深度自上而下分别是 0.5，4.2，3.8，3.7，3.5 m，施工 4 道支撑，纵向每层土体分 6 段开挖，自北向南施工长度分别为 27，17，16，16，17，14 m。具体的计算模型网格画分如图 1 所示。在基坑每层土开挖前，先把坑内地下水位降到每一开挖层坑底以下 0.5 m。

3 坑底加固置换率对基坑的影响分析

本文以地下连续墙侧移、弯矩和内支撑轴力作为

分析对象, 分析了杭州地铁 1 号线湘湖站基坑坑底加固置换率对基坑水平向变形、地连墙弯矩和内支撑轴力的影响规律。其中本文规定地连墙水平位移向基坑内变形值为正, 反之为负。地连墙弯矩外侧受拉为负, 基坑内侧受拉为正。内支撑轴力受压为正, 受拉为负。

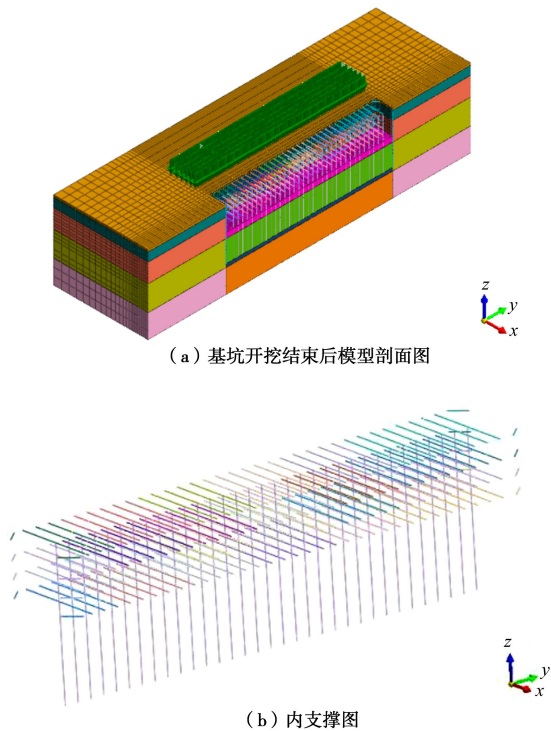


图 1 北 2 基坑围护体系有限元计算模型图

Fig. 1 Finite-element model for enclosure and support system of foundation pit

图 2,3 分别给出了为不同坑底加固置换率下基坑长边地连墙的水平位移变形曲线及其对应的最大侧移与坑底加固置换率的关系曲线。总体来看, 随着加固置换率  $M$  的增加, 地连墙的顶部和最大侧移位置的侧向变形都不断减小, 地连墙最大侧移点的位置深度也不断上移, 且当置换率从 0% 增加到 100% 时, 墙体最

大侧移从 120 mm 逐渐减小至 100, 73, 65, 27, 13 mm。上述数据也表明当  $M$  小于等于 30% 时, 地连墙的墙体最大侧移位移的减幅虽然较大, 但最大侧移值仍然偏大 ( $0.3\%H=60.8$  mm)。当置换率从 30% 增加至 60% 时, 墙体侧移减幅也较大, 最终最大侧移值满足规范要求, 且最大侧移位置上移至基坑开挖面处。当  $M$  从 60% 增至 100% 时, 墙体变形侧移变化幅度进一步减小, 最大侧移位置从 16 m 处移至 12 m。综上所述, 杭州地铁 1 号线湘湖站坑底加固置换率对地连墙的侧向变形影响较大, 当坑底加固置换率达到一定值 (30%~60%) 时, 地连墙墙体变形才能满足规范要求。

根据墙体最大侧移与坑底加固率的关系曲线可以看出, 随着基坑开挖深度的增加, 坑底加固率对基坑侧向变形的影响也愈加明显。总体来看, 在坑底加固率为 60% 之前这种影响较为显著, 当加固率超过 60% 时坑底加固率对基坑侧移的影响也越发不明显, 即对杭州地铁 1 号线湘湖站基坑坑底有效加固置换率为小于 60% 为宜。而据图 2, 3 所知, 坑底加固置换率对基坑短边侧移的影响非常有限, 基本可以忽略不计。综上所述, 对于像杭州地铁湘湖站软土地区的狭长型深基坑, 坑底加固是抑制基坑变形的重要手段, 但在满足基坑变形的条件下, 可以将坑底加固置换率控制在一定的范围之内, 以减小工程量和降低工程造价。

图 4,5 分别给出了基坑开挖到底面时不同坑底加固置换率条件下地连墙的弯矩分布图和不同层位内支撑轴力的变化。由图 4 可以看出, 当置换率从 0 增加到 30% 时, 地连墙弯矩形态发生较大改变, 最大负弯矩从 1500 kN·m/m 减小到 800 kN·m/m, 减幅约为 47%。墙体最大正弯矩从 3000 kN·m 减小到 1700 kN·m, 减幅约 43%, 且最大弯矩位置略微上移; 当置换率从 30% 增加至 60% 时, 墙体正弯矩减幅约为 53%,

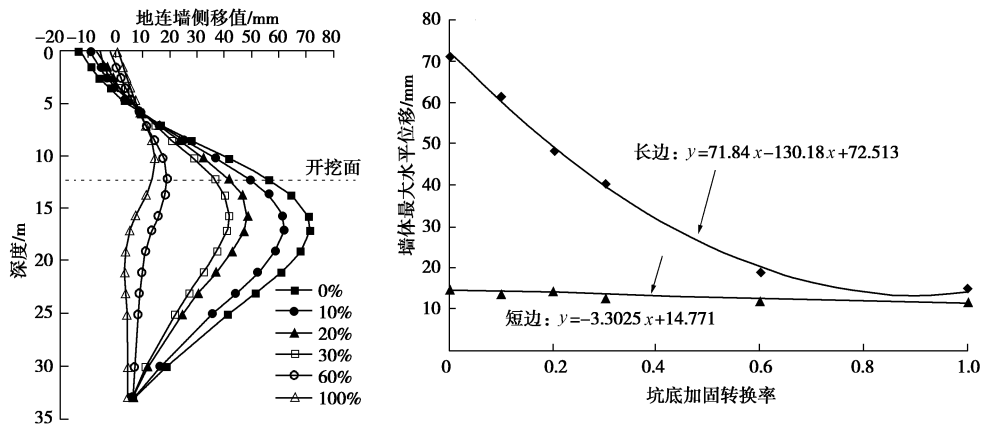


图 2 开挖至 12.2 m 时地连墙侧移值

Fig. 2 Lateral displacements of diaphragm wall with excavation depth of 12.2 m

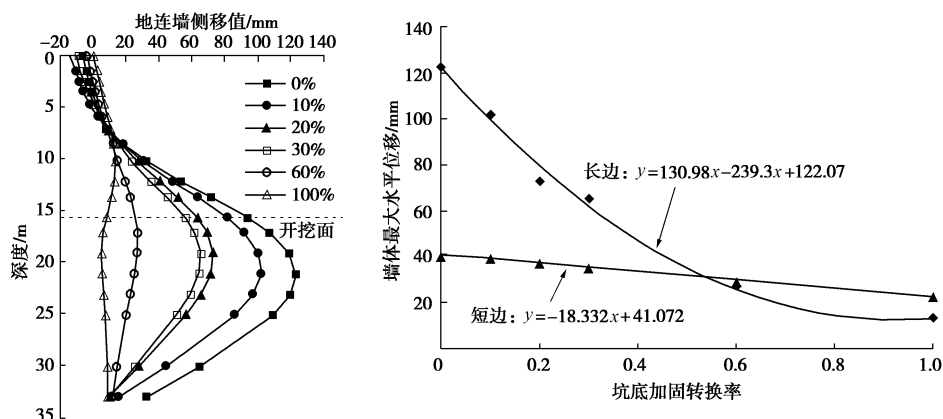


图3 开挖至 15.7 m 时地连墙侧移值

Fig. 3 Lateral displacements of diaphragm wall with excavation depth of 15.7 m

墙体负弯矩减幅为 20%，最大弯矩位置深度逐渐向开挖面附近移动；然而，当置换率从 60% 继续增大至 100% 时，地连墙的弯矩分布及其最大值的变化甚微。从坑底加固置换率对墙体弯矩影响的位置来看，沿墙体的主要影响深度范围坑壁为 5~12 m 和距基坑底以下 5 m 左右处。

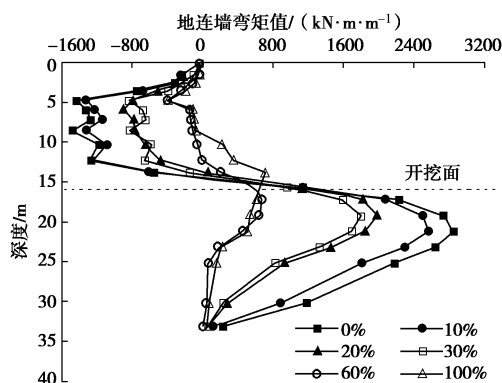


图4 基坑地连墙弯矩分布图

Fig. 4 Bending moments of diaphragm wall

根据图 5 可以看出，基坑坑底加固置换率对最下面两道内支撑轴力影响较大，特别是最后一道内支撑。相比其他几道内支撑，随着置换率的增加，第四道内支撑的最大轴力值减小幅度非常明显。主要原因应为第四道支撑深度较深，更接近于坑底，坑底加固后，

坑底抗隆起能力增强，地连墙最大位移、最大正弯矩大幅减小，从而导致最后一道支撑轴力大幅度减小。

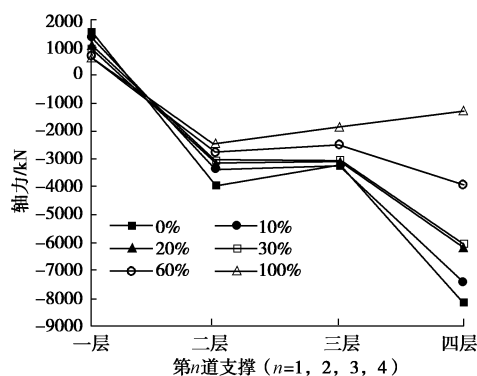


图5 基坑内支撑最大轴力变化

Fig. 5 Maximum axial forces of inner support

#### 4 计算结果与工程事故的对比分析

根据设计要求北二基坑被动区将按照图 6 (a) 进行坑底以下 3 m 的水泥土搅拌桩抽条加固，但施工单位根据杭州地铁其他车站基坑类似的施工经验，施工时在基坑开挖前 28 天采用自流深井降水到基坑开挖面以下 3 m，进行地基固化处理，以此方式替代原设计中地加固方式，导致实际被动区加固如图 6 (b)

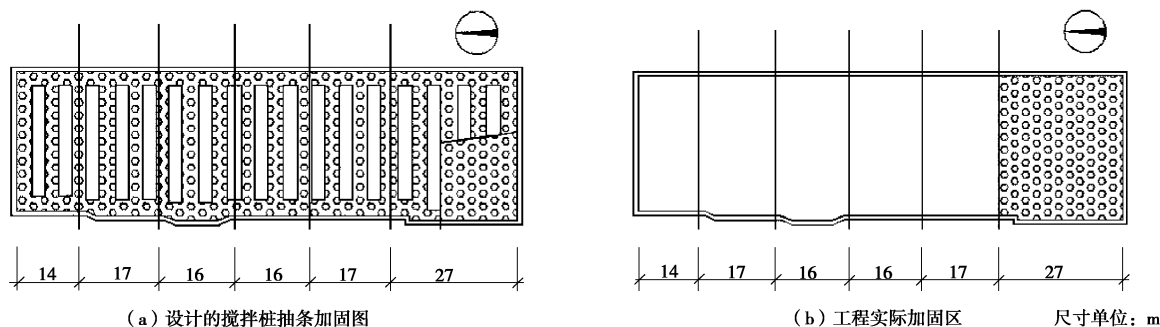


图6 基坑坑底被动区加固示意图

Fig. 6 Schematic diagrams of reinforced area at pit bottom

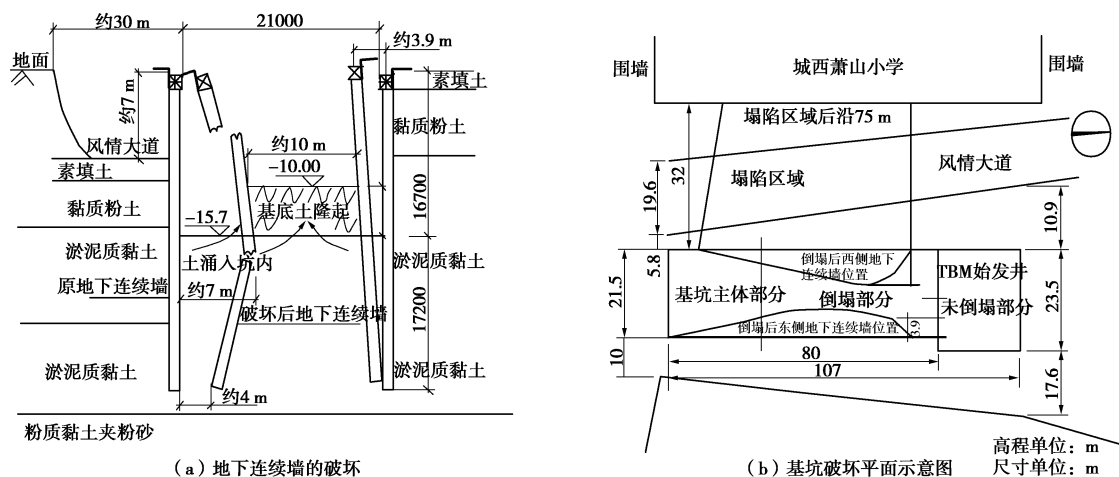


图 7 杭州地铁湘湖站北二基坑事故示意图

Fig. 7 Schematic diagrams of collapse accident

所示。由于北二基坑坑底为淤泥质土层, 渗透系数很小 (约为  $4.29 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$ ), 采用该降水方式几乎不起作用, 并且降水时间较短, 达不到地基固化处理的目的, 因此基坑地下连续墙在开挖二~六段变形过大, 促使了事故的发生, 事故发生时基坑破坏情况示意图如图 7 所示。

根据图 4 可知, 坑底加固置换率对地连墙弯矩分布影响较大的位置分别位于基坑侧壁深度范围为 5~9 m 和基坑以下 6 m 作用。与图 7 (a) 对比可知, 杭州地铁湘湖站北二基坑地连墙的破坏位置正好位于坑底加固置换率对地连墙弯矩分布影响较大的位置, 这也说明坑底加固对该基坑的地连墙破坏将会起到重要的抑制作用。同时, 根据图 7 (b) 也可以发现, 加固区的地连墙在工程事故中并未倒塌, 充分说明了坑底加固对杭州地铁湘湖站北二基坑的安全起重要作用。

## 5 结 论

本文主要针对杭州地铁 1 号线湘湖站北二基坑建立了三维有限元分析模型, 分析了不同坑底加固置换率条件下基坑地连墙的水平向位移、弯矩和内支撑轴力的变化规律, 并把计算结果与该工程事故情况进行了对比分析, 得出的主要结论如下:

(1) 杭州地铁 1 号线湘湖站坑底加固置换率对地连墙的侧向变形影响较大, 当坑底加固置换率达到一定值 (30%) 时, 地连墙墙体变形才能满足规范要求。但是当置换率超过 60% 时, 坑底加固置换率对基坑侧移的影响也越发不明显。

(2) 从坑底加固置换率对墙体弯矩影响的位置来看, 当置换率低于 60% 时其对地连墙的弯矩影响也较大, 而超过 60% 时影响非常有限, 沿墙体的主要影响深度范围坑壁为 5~12 m 和距基坑底以下 5 m 左右

处。同时, 相比其他几道内支撑, 随着置换率的增加, 最低层内支撑的最大轴力值减小幅度非常明显。

(3) 根据计算结果与杭州地铁 1 号线湘湖站北二基坑的对比分析, 可以发现杭州地铁湘湖站北二基坑地连墙的破坏位置正好位于坑底加固置换率对地连墙弯矩分布影响较大的位置, 这也说明坑底加固对该基坑的地连墙破坏将会起到重要的抑制作用。同时, 已加固区的地连墙在工程事故中并未倒塌, 再次充分说明了坑底加固对杭州地铁湘湖站北二基坑的安全起重要作用。

## 参考文献:

- [1] 饶 猛. 杭州某软弱土基坑工程重建稳定性及变形特性分析研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012. (RAO Meng. Stability and deformation analysis of a rebuilt excavation engineering in soft clay in Hangzhou[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012. (in Chinese))
- [2] 张旷成, 李继民. 杭州地铁湘湖站“08.11.15”基坑坍塌事故分析[J]. 岩土工程学报, 2010, 29(增刊 1): 338 - 342. (ZHANG Kuang-cheng, LI Ji-min. Accident analysis for“08.11.15”foundation pit collapse of Xianghu Station of Hangzhou metro[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(S1): 338 - 342. (in Chinese))
- [3] 陈云敏, 胡 琦, 陈仁朋. 杭州地铁湘湖车站基坑坍塌引起的基底土深层扰动与沉降分析[J]. 土木工程学报, 2014, 47(7): 110 - 117. (CHEN Yun-min, HU Qi, CHEN Ren-peng. Soil disturbance by the collapse of retaining wall for a pit excavation and the induced additional settlement: a case study of Hangzhou Metro Xianghu Station[J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(7): 110 - 117. (in Chinese))

- [4] 夏建中, 罗战友, 龚晓南. 基坑内土体加固对地表沉降的影响分析[J]. 岩土工程学报, 2008, **30**(增刊): 212 - 215. (XIA Jian-zhong, LUO Zhan-you, GONG Xiao-nan. Influence of improvement soil in foundation pits on ground settlement[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, **30**(S0): 212 - 215. (in Chinese))
- [5] 姚燕明, 周顺华, 孙巍, 等. 坑底加固对平行换乘车站基坑变形影响的计算分析[J]. 地下空间, 2004, **24**(1): 7 - 10. (YAO Yan-ming, ZHOU Shun-hua, SUN Wei, et al. Calculation and an analysis of influence of bottom strengthening on deformation of foundation pit for parallel transition station[J]. Underground Space, 2004, **24**(1): 7 - 10. (in Chinese))
- [6] 朱志祥, 刘少伟, 刘新荣, 等. 某地铁车站软土深基坑加固效果研究[J]. 地下空间与工程学报, 2014, **10**(3): 716 - 720. (ZHU Zhi-xiang, LIU Shao-wei, LIU Xin-rong, et al. Study on the reinforcing effect of a deep foundation pit in Soft soil of a metro station[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2014, **10**(3): 716 - 720. (in Chinese))
- [7] 蒋建平. 深基坑坑底加固体的刚度效应研究[J]. 工程力学, 2011, **28**(6): 130 - 140. (JIANG Jian-ping. Study on stiffness effect of reinforcement mass in bottom of deep excavation[J]. Engineering Mechanics, 2011, **28**(6): 130 - 140. (in Chinese))
- [8] 黄宏伟, 任臻, 钱伟. 深基坑内加固与墙体侧向位移的相互影响实测分析[J]. 建筑结构, 2000, **30**(11): 55 - 57. (HUANG Hong-wei, REN Zhen, QIAN Wei. Interaction analysis on consolidation of soil and lateral deformation of retaining wall in excavation pit[J]. Building Structure, 2000, **30**(11): 55 - 57. (in Chinese))
- [9] 黄绍铭, 高大剑. 软土地基与地下工程[M]. 2版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005. (HUANG Shao-ming, GAO Da-zhao. Foundation and underground engineering in soft ground[M]. 2nd ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2005. (in Chinese))
- [10] 张雪婵. 软土地基狭长型深基坑性状分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2012. (ZHANG Xue-chan. Behavior of narrow-deep excavation in soft clay ground[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012. (in Chinese))
- [11] 徐中华. 上海地区支护结构与主体地下结构相结合的深基坑变形性状研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2007. (XU Zhong-hua. Deformation behavior of deep excavations supported by permanent structure in shanghai soft deposit[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2007. (in Chinese))

(责任编辑 胡海霞)