

钱塘江边冲海积粉土基坑性状研究

杨迎晓^{1,2}, 龚晓南², 张雪婵², 靳建明¹, 张智卿¹, 徐毅青¹

(1. 浙江树人大学城建学院, 浙江 杭州 310015; 2. 浙江大学岩土工程研究所, 浙江 杭州 310058)

摘要: 钱塘江河口沿江的水文、地质条件复杂, 江边粉土基坑面临洪水、强潮威胁。在大量工程调研的基础上, 选择钱塘江杭州段海塘和地质典型断面, 对钱塘江高潮位及设计洪水位, 分基坑离江距离、坑底加固、开挖深度、围护墙插入深度对江边冲海积粉土基坑性状的影响进行了数值研究。结果表明: 江边粉土基坑在江水位作用下变形大; 坑底加固对粉土基坑效果显著; 江边粉土基坑围护结构底部区域的流速大、流网密集, 应采取措施尽量降低基坑内外水头差, 当止水帷幕漏水时, 应有紧急应付漏水的对策。数值模拟结果为工程设计提供依据和参考。

关键词: 钱塘江冲海积粉土; 江边基坑; 江水位; 变形; 数值分析

中图分类号: TU44

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2012)S0-0750-06

作者简介: 杨迎晓(1963-), 女, 浙江嘉兴人, 博士, 教授, 主要从事土力学等方面的研究与教学工作。E-mail: 770499445@qq.com。

Behaviors of alluvial silt foundation pits along Qiantang River

YANG Ying-xiao^{1,2}, GONG Xiao-nan², ZHANG Xue-chan², JIN Jian-ming¹, ZHANG Zhi-qing¹, XU Yi-qing¹

(1. Urban Construction College, Zhejiang Shuren University, Hangzhou 310015, China; 2. Institute of Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: The hydrological and geological conditions of Qiantang River estuary are very complicated. The foundation pits along it are threatened by floods and strong tides. Based on the intensive investigations of projects, seawalls and typical geological cross sections of Hangzhou reach of Qiantang River are selected to conduct numerical studies on the effects of high tidal level and design flood level of Qiantang River, distance of pit from the river, reinforcement of the pit bottom, excavation depth and insertion depth of enclosure walls on the behaviors of the alluvial silt foundation pits. The results reveal that (1) the silt pits along the river undergo large deformations under the effects of water levels, (2) the improvement by the reinforcement of pit bottoms is noticeable, (3) the seepage at the bottom of the enclosure structures for the silt pits is fast and the flows are concentrated, thus measures should be taken to lower the water head differences between the inside and the outside of the pits, and when cut-off walls leak, emergency countermeasures should be taken. The numerical results offer references for engineering design.

Key words: Qiantang River alluvial silt; riverside pit; water level; deformation; numerical analysis

0 引言

钱塘江河口是举世闻名的强潮河口, 涌潮动力强劲, 河口两岸临江海塘堤长共约 400 km。平原地面高程比钱塘江高潮位低 2~4 m。江边海塘、基坑面临洪水、强潮和台风三大动力作用及其灾害威胁^[1]。钱塘江冲海积粉土广泛分布在钱塘江河口冲海积平原, 钱塘江流域正在开展大规模的建设, 以钱塘江为轴线, 沿江开发, 跨江发展, 众多的高层、超高层建筑及市政生命线工程均建于钱塘江冲海积粉土上^[2]。粉土是一种工程性质多变的土类, 其物理力学性质介于细粒无黏性土和黏性土之间^[3], 工作性态复杂, 这也是粉土地基工程事故屡见不鲜的原因^[4-5]。江边基坑邻近钱

塘江, 地下水补给充分, 地下水位高。基坑所处的钱塘江冲海积粉土, 渗透稳定性差, 抗渗强度低。在钱塘江江边冲海积粉土地基中进行深基坑开挖容易出现流砂、管涌等现象, 引起土体流失, 造成基坑邻近的地面坍塌, 进而危及周边建筑物和公共设施的安全。本文在对钱塘江南北两岸大量工程调研的基础上, 选择钱塘江杭州段海塘和地质典型断面, 对钱塘江高潮位及设计洪水位, 分基坑离江距离、坑底加固、开挖

基金项目: 国家自然科学基金项目(51078377); 浙江省科技计划资助项目(2008C33002); 浙江省高校十二·五重点学科资助项目([2012]80-291)

收稿日期: 2012-08-25

深度、围护墙插入深度对江边冲海积粉土基坑性状的影响进行数值研究, 为工程设计和施工提供依据和参考。

1 钱塘江边粉土基坑水文地质特征

钱塘江冲海积粉土层是在一个复杂的地质地理环境中形成的。距今 0.25 万年, 进入全新世晚期(Q³₄)~亚大西洋期, 钱塘江喇叭口已发育成锥型, 并出现钱江涌潮, 由于潮流的侵蚀堆积与搬运, 使北岸不断受到侵蚀, 岸线后退, 南岸逐渐堆积, 岸线不断外伸, 进而形成钱塘江河口冲海积平原。全新统上中段河口相(al~m Q²⁺³₄)冲海积粉土主要分布在杭州市钱塘江两岸, 呈“高粉性, 低黏性”的地区特点。

1.1 水文特征

钱塘江河口是举世闻名的强潮河口, 潮波从外海经杭州湾传入河口段, 受到地形地貌影响, 潮位和潮差变幅大, 对海塘、基坑等各种建筑物破坏力极大。杭州市钱塘江防洪堤属浙江省重点工程, 结构设计标准按百年一遇洪水考虑, 属于一级水工建筑物。通过对杭州市钱塘江防洪堤, 钱塘江设计低水位、高潮水位和洪水水位的大量调研, 确定钱塘江高潮位为9.27 m, 设计洪水位8.57 m、平均高水位4.47 m, 以及平均低水位3.87 m(黄海高程)做为江水位进行分析。

1.2 地质特征

对钱塘江杭州段南北两岸的下沙, 钱江新城, 滨江几十项工程近千个钻孔进行研究分析, 粉土颗粒组成特征及基本物理力学性质具有如下特性。

(1) 矿物成分和颗粒组成

通过X衍射试验及电镜扫描试验得到矿物成份以50 μm 左右粉粒级 a-石英为主, 约占 50%左右; 微长

石、正长石次之, 约占 27%左右; 伊利石为 15%左右, 绿泥石 7%左右。

钱塘江冲海积粉土以砂质粉土为主, 主要粒径集中在 0.075~0.01 mm 之间, 砂质粉土平均粉粒含量 70%~90%, 平均黏粒含量在 1.5%~6.8%, 多小于 5%。

(2) 基本物理力学特性

粉土的天然含水率在 25%~33%, 一般均处于饱和状态; 砂质粉土孔隙比为 0.764~0.866, 静力触探锥尖阻力 q_c 的平均值在 3.73~7.92 MPa 之间; 压缩模量均值为 8~12 MPa。

(3) 渗透特性

竖向渗透系数砂质粉土为 1.1~7.2×10⁻⁴ cm/s, 砂质粉土夹粉砂和粉砂夹砂质粉土为 1.2×10⁻⁵ ~ 5.5×10⁻³ cm/s。钱江新城某工程现场抽水试验粉土渗透系数为 5.23~11.80×10⁻⁴ cm/s; 滨江某工程现场抽水试验砂质粉土渗透系数为 7.54~14.30×10⁻⁴ cm/s, 砂质粉土夹粉砂 6.43~6.49×10⁻⁴ cm/s。现场抽水试验的结果是整个潜水含水层渗透性的综合体现, 夹有薄层或透镜体状的粉砂, 增强透水能力。

2 计算模型与参数

2.1 模型建立

通过对钱塘江杭州段防洪堤, 钱塘江设计低水位、高潮水位和洪水水位的大量调研, 确定江边粉土基坑、海塘和地质典型断面见图 1, 图中高程为黄海高程。

原始基坑尺寸取 80 m×30 m, 基坑开挖深度取 20 m。支护结构采用 1 m 厚地下连续墙, 连续墙插入坑底以下 20 m。采用 5 道支撑, 截面为 1 m×1 m, 支撑中心轴线标高为-1, -5, -9, -13, -17 m^[6-7]。连续墙和支撑的弹性模量 E=3×10⁴ MPa。分别采用 15 节点单

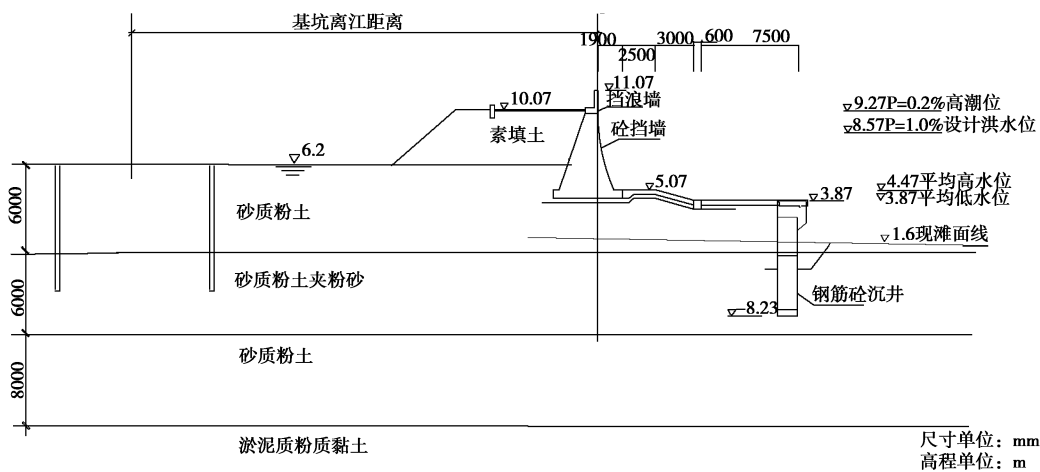


图 1 钱塘江边海塘和地质典型断面图

Fig. 1 Typical geological cross section of seawalls of Qiantang River

表 1 模型计算参数表
Table 1 Parameters for model calculation

土层名称	γ_{usat} /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	γ_{sat} /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	k_x /($\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$)	k_v /($\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$)	E_{50} /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-2}$)	E_{oed} /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-2}$)	E_{ur} /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-2}$)	m	c_{ref} /kPa	φ /($^{\circ}$)	ν_{ur}	K_0^{nc}
填土	16.5	18.5	0.016	0.031	10000	10000	30000	1.0	10.4	20.6	0.2	0.648
砂质粉土	17.0	18.8	3.361	0.320	13800	13800	41400	0.6	11.89	34.0	0.2	0.403
砂质粉土 夹粉砂	17.0	19.1	4.795	0.538	17000	17000	51000	0.6	7.0	33.0	0.2	0.403
淤泥质粉 质黏土	16.0	18.8	0.010	0.010	10000	10000	30000	0.9	4.0	29.5	0.2	0.577
坑底加 固层	21.5	22.0	0.010	0.010	60000	60000	180000	0.9	50.0	40	0.2	0.357

注：表中 E_{50} 为三轴固结排水实验割线模量； E_{oed} 切线压缩模量； E_{ur} 为卸载 - 再加载模量。

元、Plate 单元和 Anchor 单元来模拟土体、围护结构和支撑。地下水分布情况在有限元分析的初始条件中设定。土体的本构模型采用了可以考虑卸载、再加载和初次加载时土体模量不同的 Harding-Soil 模型，竖向应变 ε_1 和偏应力 q 之间为下式的双曲线关系：

$$-\varepsilon_1 = \frac{1}{2E_{50}} \frac{q}{1 - q/q_a}, \quad (1)$$

建立了土与结构接触面单元，并应用激活或冻结类组和结构对象来模拟基坑开挖分步施工，使计算结构与实际工程接近。模型底部固定于距地表 50 m 深处的基岩，为标准固定边界；模型左侧取基坑开挖中心线，施加竖直滑动约束；模型右侧取沉井出去 8 m 处，施加竖直滑动约束。钱塘江边冲海积粉土基坑有限元计算模型如图 2 所示。

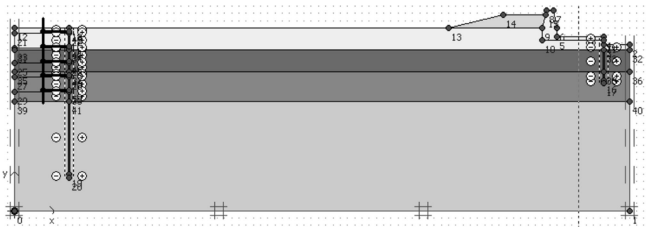


图 2 钱塘江边冲海积粉土基坑有限元计算模型

Fig. 2 Finite element model for alluvial silt foundation pits along Qiantang River

2.2 计算参数

钱塘江冲海积粉土显著的特性之一是在剪切中膨胀，剪胀主要与粉土的密度和围压有关^[8]。通过大量的三轴固结不排水 CU 和固结排水 CD 试验，模型计算中砂质粉土剪胀角 $\psi=1.2^{\circ}$ ，砂质粉土夹粉砂剪胀角 $\psi=1.5^{\circ}$ 。模型计算参数见表 1。

2.3 计算工况

钱塘江边粉土基坑数值分析江水位分别考虑高潮位 9.27 m、设计洪水位 8.57 m、平均高水位 4.47 m 以及平均低水位 3.87 m，各种水位的高程为黄海高程。分以下几种情况进行分析。

(1) 江水离开基坑中部距离分别为 350，250，

150 m 分析离江距离对基坑性状的影响。

(2) 取距离江水 150 m，基坑做坑底加固处理，分析加固对基坑性状的改良作用。

(3) 同样取距离江水 150 m 的基坑，分开挖深度为 5，10，20 m，取围护墙插入深度同开挖深度，分析不同挖深情况下的基坑性状。

(4) 再取距离江水 150 m 的基坑，开挖深度取定 20 m，围护墙插入深度取 20，17，14，11，8，5 m 分析墙体插入深度对基坑性状的影响。

3 计算结果与分析

3.1 离江距离对基坑性状的影响

离江距离对基坑性状的影响如图 3~6，图例中第 1 个数表示基坑离江距离；w927 表示高潮位、w857 表示设计洪水位、w447 表示平均高水位、w387 表示平均低水位。由图 3~6 可以看出，钱塘江边冲海积粉土基坑在江水位作用下变形大。离江距离分别为 350，250，150 m，连续墙变形在 70~100 mm，地表沉降在 45~70 mm，坑底隆起在 100~150 mm 范围。由于高潮位和设计洪水位比较接近，其对基坑性状的影响基本相同，对应的连续墙变形、地表沉降、坑底隆起曲线近似重合。随着江水位的升高，连续墙变形和坑底隆起显著增加。混凝土海塘由于挡水效果明显，3 倍基坑开挖宽度以内，江水位高时，地表沉降也较大，3 倍基坑开挖宽度以外，地表基本不发生沉降。只有处于平均低水位时，离江距离对连续墙变形有显著影响，其它 3 种水位情况下，离江距离对连续墙变形的影响较弱。离江距离远近对坑底隆起的影响较小。从图 6 离江距离对安全系数的影响看出，在渗透性强的临江粉土地基，用混凝土海塘做挡水结构是必要的。

3.2 坑底加固对基坑性状的影响

在开挖面 4 m 范围内做满堂加固，加固区模型计算参数见表 1。坑底加固后，连续墙变形、地表沉降和坑底隆起都有显著减小。连续墙最大侧移减小 34% 左右，地表沉降最大值减小 34% 左右，坑底隆起减小

25%左右, 且最大侧移点稍微下移, 最大沉降点向外推移。由此可见, 坑底加固对改善变形和沉降有显著的效果, 如果想得到更好的改善效果, 可以采用加大水泥掺量和提高龄期等方法。在相同加固条件下, 土层渗透系数较大, 土体受渗流影响较大, 当进行坑底加固后, 坑底土体强度提高, 渗透系数显著减小, 所以改良效果较好。当地质条件坑底加固区在软土层里, 坑底以下经改良后全是渗透系数较小的土层, 水头损失大, 渗透破坏影响减小。

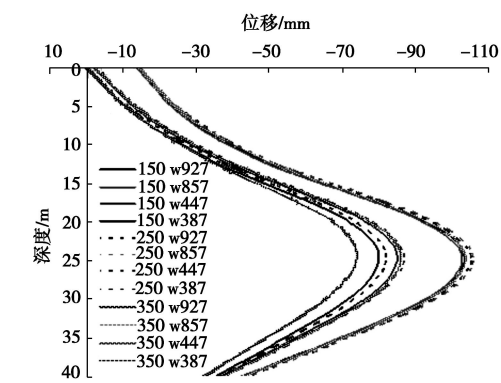


图 3 离江距离对连续墙变形的影响
Fig. 3 Effects of distance from the river on wall deflection

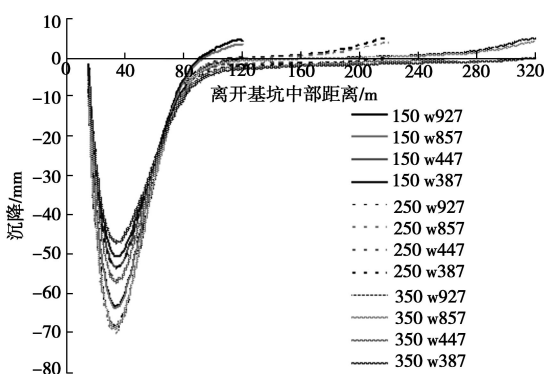


图 4 离江距离对地表沉降的影响
Fig. 4 Effects of distance from the river on surface settlement

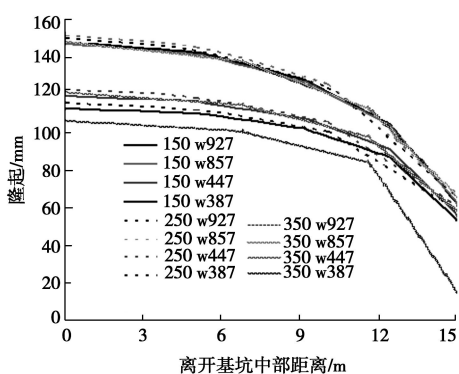


图 5 离江距离对坑底隆起的影响
Fig. 5 Effects of distance from the river on upheaving of pit bottoms

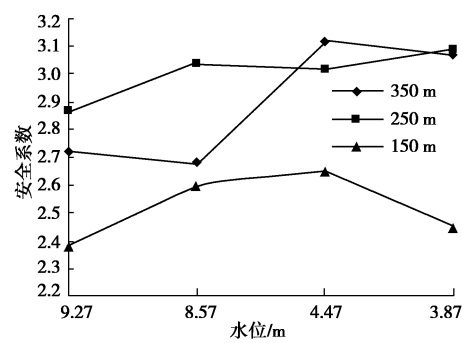


图 6 离江距离对安全系数的影响
Fig. 6 Effects of distance from the river on safety factor

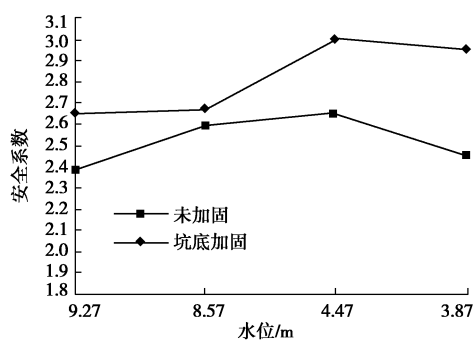


图 7 坑底加固对安全系数的影响
Fig. 7 Effects of bottom strengthening on safety factor

3.3 开挖深度对基坑性状的影响

开挖深度不同, 墙体的变形模式也不同。开挖 5 m 时, 由于不设支撑, 墙体向坑内倾斜, 当水位较高时, 侧斜很大, 所以在离江较近处开挖基坑即使只开挖 5 m, 也很有必要设置一道支撑。开挖 10 m 时, 第一道支撑设在地表下 1 m 处, 第二道支撑设在开挖面下 5 m 处, 此时墙体变形呈现踢脚破坏模式。开挖 20 m 时, 墙体侧移呈现出开挖面附近侧移最大, 两头侧移较小的模式。地表沉降量和坑底隆起随开挖深度的加大而加大。挖深 20 m, 沉降量最大, 挖深 10 m 和 5 m 时, 地表沉降量较接近。图 8 为开挖深度对基坑安全系数的影响。由于开挖 10 m 和 20 m 时, 挡墙插入相对不透水层, 所以基坑安全系数较大。挖深 10 m, 连续墙 20 m, 连续墙在软土隔水层里了, 由于完全阻隔坑内外水力联系, 且基坑开挖深度相对开挖 20 m 小很多, 所以安全系数最大。如果连续墙还在粉土里存在一定的渗透条件, 其安全系数比上种情况小很多。开挖 5 m 时, 挡墙位于相对透水层内, 此时由于地基渗透性较大, 基坑安全系数较小, 在高潮位和设计洪水位下, 其安全系数只有 1.5 左右, 较为危险。在透水性较强的钱塘江冲海积粉土地基开挖深基坑时, 挡墙或止水帷幕插入到相对不透水层内能大大提高基坑的安全系数。

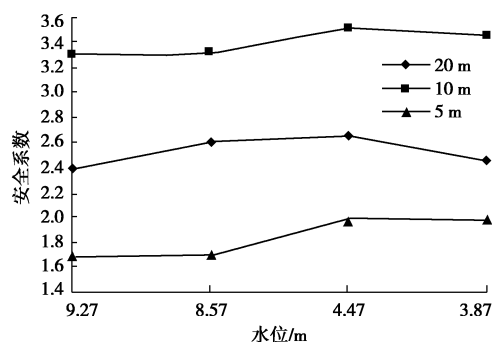


图8 开挖深度对安全系数的影响

Fig. 8 Effects of excavation depth on Safety factor

3.4 围护墙插入深度对基坑性状的影响

图9, 10为基坑离江150 m距离, 开挖深度20 m, 高潮位下, 围护墙插入深度对基坑性状的影响。由于上部支撑设置一致, 所以开挖面以上支护变形基本一致。围护墙插入深度较小时, 支护结构呈踢脚破坏模式; 当插入深度较大时, 呈现中间大两头小的变形模式。随着插入深度的加大, 地表沉降减小, 14 m的插入深度已较能达到20 m插入深度想要的效果。随着围护墙插入深度的加大, 坑底隆起虽有一定的减小, 但是总的来说影响不大。

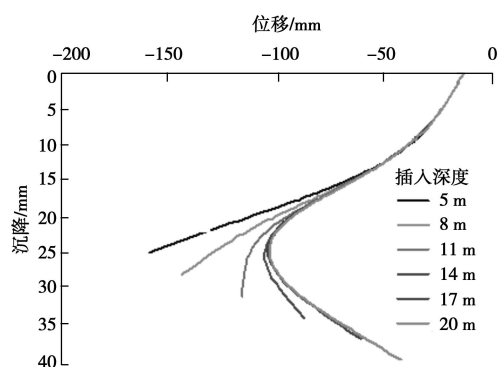


图9 围护墙插入深度对连续墙变形的影响

Fig. 9 Effects of insertion depth on wall deflection

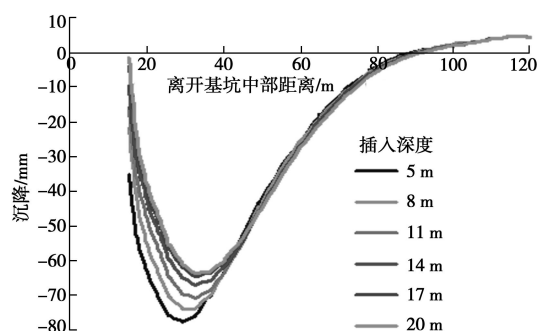


图10 围护墙插入深度对地表沉降的影响

Fig. 10 Effects of insertion depth on surface settlement

3.5 渗透分析

对挖深5 m、挖深10 m和挖深20 m的基坑进行了渗透分析。由流速云图计算结果可以看出, 围护墙插入深度增大后, 墙底处的渗流流速有较大减小。围护结构底部区域的流速非常大、流网密集。水沿着围护结构向坑内渗流。图11为挖深10 m围护墙附近沿程水头变化图。

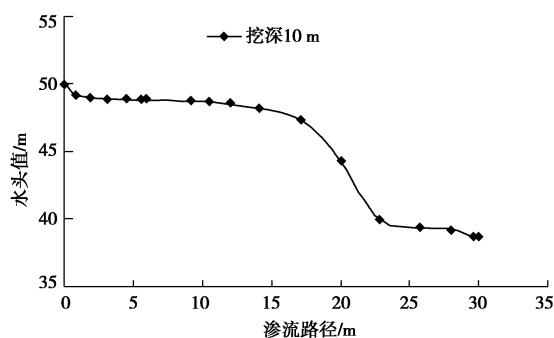


图11 挖深10 m围护墙附近沿程水头变化

Fig. 11 Change of water head

4 结论

通过对钱塘江边冲海积粉土基坑性状的数值分析, 得到以下初步结论:

(1) 钱塘江边冲海积粉土基坑在江水位作用下变形大。3倍基坑开挖宽度以内, 江水位高时, 地表沉降也较大, 3倍基坑开挖宽度以外, 地表基本不发生沉降。

(2) 坑底加固后, 连续墙变形、地表沉降和坑底隆起都有显著减小。连续墙最大侧移减小34%左右, 地表沉降最大值减小34%左右, 坑底隆起减小25%左右。

(3) 开挖深度不同, 墙体的变形模式也不同。地表沉降量和坑底隆起随开挖深度的加大而加大。地表沉降呈现“漏斗”状, 最大点发生在距离围护结构1倍开挖深度的地方。

(4) 围护墙插入深度较小时, 支护结构呈踢脚破坏模式, 当插入深度较大时, 呈现中间大两头小的变形模式。挡墙位于地基渗透性较大粉土层内时, 基坑安全系数最小。

(5) 钱塘江边冲海积粉土基坑围护结构底部区域的流速大、流网密集。在保证工程周边环境安全的基础上, 尽量降低基坑内外水位差, 并且当止水帷幕漏水时, 应有应付漏水的对策。

参考文献:

- [1] 史英标, 林炳尧, 徐有成. 钱塘江河口洪水特性及动床数值预报模型[J]. 泥沙研究, 2005, 18(1): 7 - 132. (SHI Ying-biao, LIN Bing-yao, XU You-cheng. Characteristic of

- the flood level in the Qiantang Estuary and mobile-bed model for forecast[J]. *Journal of Sediment Research*, 2005, **18**(1): 7 - 132. (in Chinese))
- [2] 杭州市建筑业管理局. 深基坑支护工程实例[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1996. (Hangzhou Construction Management Bureau. Examples of building foundation excavation engineering[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1996. (in Chinese))
- [3] GB50007—2002 建筑地基基础设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002. (GB50007—2002 Code for design of building foundation[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2002. (in Chinese))
- [4] FLETCHER Lara, HUNGR Oldrich, EVANS S G. Contrasting failure behaviour of two large landslides in clay and silt[J]. *Can Geotech*, 2002, **39**: 46 - 62.
- [5] 上海轨道交通 4 号线事故纪实简介[J]. *岩石力学与工程学报*, 2003, **23**: 1038. (A briefing document of the accident on the Shanghai Metro line 4[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, **23**: 1038. (in Chinese))
- [6] JGJ120—99 建筑基坑支护技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999. (JGJ120—99 Technical specification for retaining and protection of building foundation excavations[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1999. (in Chinese))
- [7] 龚晓南. 深基坑工程设计施工手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998. (GONG Xiao-nan. Handbook for design and construction of deep excavation pits[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1998. (in Chinese))
- [8] 杨迎晓, 朱向荣, 金兴平, 等. 钱塘江冲海积粉土剪胀性三轴试验研究[J]. *岩土力学*, 2010, **31**(增刊 2): 48 - 52. (YANG Ying-xiao, ZHU Xiang-rong, JING Xing-ping, et al. Triaxial testing study of dilatant characteristics of Qiantangjiang alluvial silts[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, **31**(S2): 48 - 52. (in Chinese))

(本文责编 黄贤沙)