

Analysis of Deformation and Economic Benefit of Shaped Gradient Cement-Soil Gravity Wall

Zhenhua Ye, Xu Han*

Department of Geotechnical Engineering College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai
Email: hanxu@tongji.edu.cn

Received: Apr. 16th, 2019; accepted: May 1st, 2019; published: May 8th, 2019

Abstract

If the horizontal displacement of the gravity-type retaining wall of the foundation pit is slightly larger than the specification requirements in the design process of the foundation pit, the way to strengthen the gravity-type retaining wall should be paid more and more attention. This paper uses the finite element numerical inversion method to establish the Plaxis stress and strain analysis model with reference to the real-time monitoring data in the excavation process of the chemical building and environmental science building of Jiangwan Campus of Fudan University. And the results show that the soil parameters obtained by the inversion method are better than the geotechnical experimental data, and are more suitable for practical conditions. Based on this model, five methods for reinforcing the gravity retaining wall are put forward. It is concluded that the steps are widened and the bottom steps are close to the pit in this paper. The two types of retaining walls are better and more economical. In theory, widening the steps is the most economical way to reinforce. It is found that the larger the aspect ratio of the step near the bottom of the pit, the more economical the reinforcement method; and the smaller the aspect ratio of the widened step, the more economical the reinforcement method. This paper analyzes the economic benefits of the gravity-type retaining wall of special-shaped cement soil, which has reference significance for similar projects.

Keywords

Numerical Inversion, Cement Soil Gravity Retaining Wall, Economic Benefit

异型水泥土重力式围护墙的变形和经济效益分析

叶真华, 韩旭*

同济大学地下建筑与工程系, 上海

*通讯作者。

Email: hanxu@tongji.edu.cn

收稿日期: 2019年4月16日; 录用日期: 2019年5月1日; 发布日期: 2019年5月8日

摘要

基坑设计过程中, 若基坑的重力式围护墙水平位移略大于规范要求, 应选择何种方式加固重力式围护墙受到了越来越大的关注。根据复旦大学江湾校区化学楼与环境科学楼基坑开挖过程中实时监测数据, 利用有限元反演方法, 建立Plaxis应力应变分析模型。结果表明, 采用反演法分析得到的土体参数优于土工试验数据, 更适用于实际工况。并在此模型基础上, 考虑分析了五种加固重力式围护墙的方法。得出结论, 台阶加宽、底部台阶靠近坑内两种围护墙加固形式更优, 更为经济。理论上, 台阶加宽是最为经济的加固方式。并发现, 靠近坑内底部台阶长宽比越大, 加固方式越经济; 而加宽的台阶长宽比越小, 加固方式越经济。本文对异型水泥石重力式围护墙的经济效益展开分析, 对类似工程具有参考意义。

关键词

数值反演, 水泥石重力式围护墙, 经济效益

Copyright © 2019 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着经济的迅猛发展, 我国地下活动日益增多, 大量基坑工程与已有地下结构相邻, 由此引发的岩土问题日益突出[1]。大规模的基坑工程之中, 基坑支护尤为重要[2]。水泥石重力式围护墙具有施工技术简单、工期短、成本低等优点, 在基坑支护工程中应用甚广[3]。目前的基坑支护设计忽略了岩土参数随着基坑开挖和变形过程中的发展变化[4], 由于岩土参数具有高度的不确定性, 设计重力式围护墙围护结构时, 往往需要根据实测数据来反演其参数, 才能做进一步研究[5]。因此, 有必要对工程涉及土体的主要物理力学参数(c 、 φ 、 E 等)进行反演分析。大量学者针对岩土体参数, 展开对反演法的研究, 例如, 孙钧等(1992)提出了一种全局优化方法, 对岩体参数展开弹塑性反演分析[6]; 田明俊等(2004)提出了虚拟位移法, 对土石坝土体参数进行反演[7]; 杨玲等(2013)运用有限元数值反演方法, 建立三维模型来反映大坝渗流及稳定特性[8]; 肖明清等(2017)提出内摩擦角 φ 、弹性模量 E 、内聚力 c 在深厚软土基坑开挖模拟中, 分别为高、中、低敏感度参数, 并基于 BP 神经网络方法对岩土体参数进行反演分析[9]。

但是, 由于分析理论的不完善, 各因素影响重力式围护墙的变形、可靠性的机制还存在许多疑问[10]。况龙川等(1998)探讨了上海地区不同开挖深度的重力式围护墙安全水平, 并得出地基承载力与水平侧移是水泥石重力式围护墙失效的重要控制因素[11]。因此, 本文在已有经验和理论研究的基础上, 主要根据重力式围护墙的水平侧移监测数据, 利用有限元反演方法, 建立 Plaxis 基坑开挖的应力应变分析模型。并结合复旦大学新江湾校区化学楼与新建环境科学楼基坑围护实际工程, 验证有限元反演模型的适用性、可靠性。

另外, 水泥石重力式围护墙在现行实际施工条件下, 墙体宽度一般为开挖深度的 0.7~1.0 倍[12]。但在搅拌桩总长度的控制上还没有完整的、更加精确的经验。实际工程应用中, 墙体的加固一般为全断面加深或加宽的方式。复旦大学新江湾校区化学楼和新建环境科学楼在其基坑围护中选择了两种不同的

混凝土重力式围护墙的施工方式。其中, 环境科学楼采用台阶形布置, 而化学楼则采用矩形断面布置。本文进一步对异型混凝土重力式围护墙变形与经济效益展开分析, 以论证环境科学楼台阶形布置基坑的适用性与合理性。

2. 有限元建模与反演分析

2.1. 有限元建模

根据复旦大学新江湾校区化学楼基坑项目的实际勘察数据(如图 1 所示), 本文利用 Plaxis 有限元软件建立模型。模型的底部边界施加完全固定约束, 左侧边界施加水平向约束, 右侧边界施加对称边界条件。根据勘察资料, 计算过程中始终考虑基坑地下水位为地下 0.5 m。为更好的模拟接触关系、更符合实际工况, 在混凝土搅拌桩底部将界面线多深入土层 1 m。利用 Plaxis 软件提供的 15 节点三角形单元模拟土体单元, 定义网格疏密度为中等。由于最终的分析主要分析混凝土搅拌桩的变形情况, 为得到更准确的计算结果, 需对混凝土搅拌桩进行局部加密, 如图 2 所示。

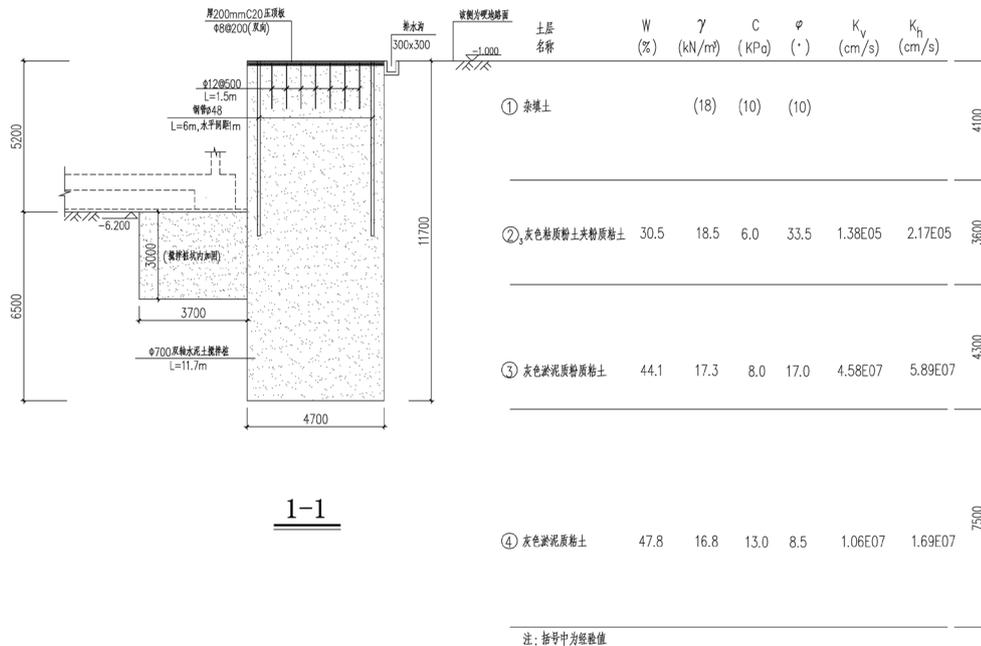


Figure 1. Sectional view of the chemical building's foundation pit in new Jiangwan campus
图 1. 新江湾校区化学楼基坑剖面图

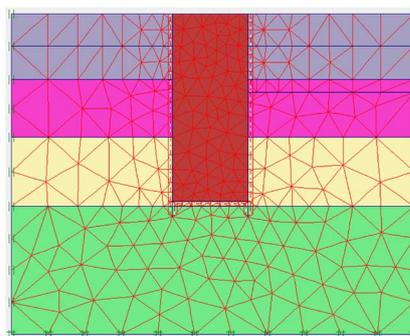


Figure 2. Finite element modeling meshing
图 2. 有限元建模网格划分

并根据实际工程开挖情况, 模拟以下施工工序, 如表 1 所示。每步开挖过程完成后, 应重新设置水位线, 模拟基坑降水。统一设置地下水水位线为基坑坑底以下 0.5 m 处。此外, 本例分析固结 30 天后的重力式围护墙的变形, 水平侧移改变量小于 1%, 故可不予考虑固结分析步。

Table 1. Simulated construction process

表 1. 模拟施工工序

施工步骤	工序号	分析方法	模拟时间
开挖至 2.0 米	1	塑性分析	0 天
开挖至 4.1 米	2	塑性分析	0 天
开挖至 5.2 米	3	塑性分析	0 天
固结分析	4	塑性分析	30 天

2.2. 反演分析

岩土参数往往具有高度的不确定性, 而且在基坑受周边环境的影响工程问题中, 目前仍以理论分析和试验为主, 土体的承载强度、压缩模量、变形模量、标准贯入度等参数一般能由地质勘查试验获得, 但数值模拟所必需的土体弹性模量无法通过试验测得。因此, 需要根据实测数据来反演岩土体参数, 建立反演模型, 从而适应实际情况。

对数据进行筛选, 排除边缘位置和数据反常的监测点。选用化学楼基坑 TX10 监测点数据进行反演。基于 TX10 监测点的土层信息, 对比 TX10 监测点的监测数据, 小范围调整土层 c 、 φ 、 E 的大小, 以最大可能与实际围护墙顶最大水平位移、基坑周边土体沉降值拟合, 拟合结果如图 3 所示, 最终反演获得合适参数见表 2。其中实测数据和反演数据在深度约 9 米处的差距明显增大, 原因可能是重力式挡土墙深部侧移发展较慢, 而监测获得本文相关数据时, 距离基坑施工工期结束时间较短, 深部侧移未发展完全。同时, 有限元模型是理想性模型, 其结果也相对理想。但实际工程中, 土体具有各种复杂特性以及全断面的重力式水泥土挡墙的施工质量也并非完全一致, 有限元模型未能完全考虑这些因素。此外, 挡墙以下(深度 11.7 米以下)的土体侧移量在实际工况中随深度增加迅速减小, 说明实际工程对重力式挡墙以下土体的影响深度较浅。这也与所建立模型的结果有一定差异, 说明模型中水泥土重力式围护墙与土体间的接触关系仍需进一步改进。

Table 2. Soil parameter of inversion model

表 2. 反演模型土体参数表

土层		土体参数						渗透系数	
编号	名称	天然重度 γ (kN/m ³)	饱和重度 γ (kN/m ³)	c (kPa)	φ (°)	ν	E	K_v (m/d)	K_h (m/d)
①	杂填土	16.0	18.0	12	10	0.30	2.00e4	0.03	0.03
②	灰色粘质粉土夹粉质粘土	17.0	18.7	7.5	15.5	0.35	2.55e4	0.01	0.01
③	灰色淤泥质粉质粘土	16.8	18.9	8.0	17.0	0.32	2.20e4	0.01	0.01
④	灰色淤泥质粘土	17.0	19.0	13.0	8.5	0.20	4.00e4	0.01	0.01
	水泥土搅拌桩	19.3	19.3	120	35	0.27	1.30e6	0	0

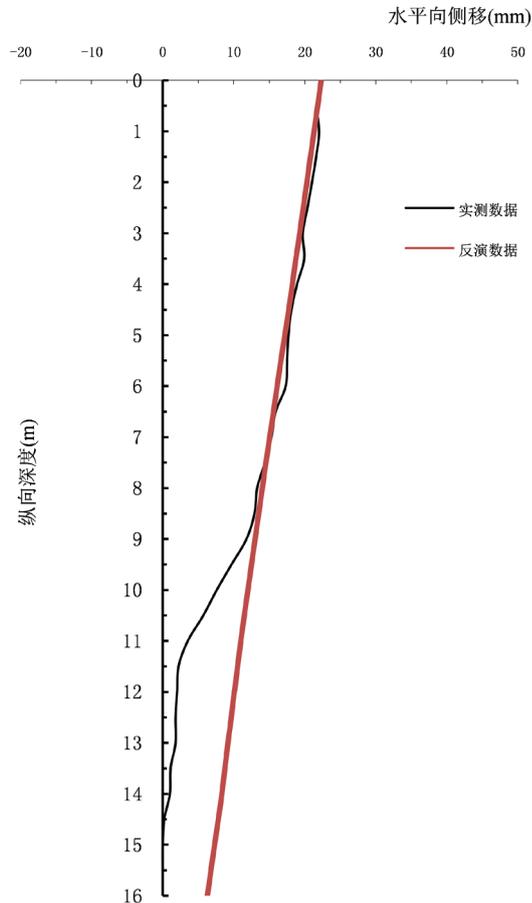


Figure 3. Inversion comparison map

图 3. 反演对比图

3. 围护墙的安全可行性分析

3.1. 临界状态分析

根据建筑基坑工程监测技术规范 GB50497-2009, 基于重力式围护墙尺寸、与周边管线等建筑的距离等因素考虑, 本文确定基坑监测报警累计值是 40 mm。用上文所述反演模型(开挖 5.2 m)继续开挖至重力式围护墙最大侧移接近 40 mm, 达到安全警戒的临界值。经反复修改开挖深度得出, 当开挖深度为 5.5m 时, 最大侧移为 39.03 mm, 认为该开挖深度是临界安全开挖深度。

3.2. 安全临界状态下多挖一层

实际工程中, 基坑的重力式围护墙水平位移略大于规范要求的情况经常发生, 采取何种形式加固重力式围护墙成为热点问题。因此, 本文考虑安全临界状态下多挖一层土, 以模拟实际工程中对已有基坑的再次深挖, 使其围护墙水平位移略大于规范要求。当多挖 0.1 m 土(即开挖深度为 5.6 m)时, 重力式围护墙最大侧移增加为 47.88 mm, 基坑最大隆起量为 23.01 mm。此时基坑处于非安全状态, 需对其支护结构进行加强。

3.3. 不同支护加强方式比较

本文研究讨论以下四种不同的重力式围护墙加强方式: 全断面加宽、全断面加长、底部台阶形重力

式围护墙、顶部台阶形重力式围护墙。比较不同重力式围护墙加固形式的经济性(见表 3、图 4), 选择最优的重力式围护墙加固形式。

由表 3 分析可得: 1) 台阶形布置的墙体加固所用水泥土方量明显小于传统的矩形断面布置, 其采用的工程材料和施工量所产生的经济效益明显优于矩形断面布置的围护墙。2) 台阶靠近坑内的台阶形重力围护墙支护效果优于台阶靠近坑外的台阶形重力围护墙, 即台阶靠近坑内的台阶形重力围护墙围护墙更经济。3) 台阶加宽、底部台阶靠近坑内两种围护墙加固形式最优, 最为经济。

Table 3. Economic comparison of reinforcement

表 3. 加固形式的经济性比较

加固形式	尺寸	水平侧移(mm)	垂直侧移(mm)	水泥土方量(m ³ /m)
全断面加宽	0.5 m × 11.7 m	34.48	19.87	5.85
全断面加长	4.7 m × 0.8 m	40.06	20.82	3.76
底部台阶靠近坑外	1.2 m × 2.7 m	39.98	20.55	3.24
底部台阶靠近坑内	1.2 m × 1.1 m	39.99	21.01	1.32
台阶形加宽	0.5 m × 3.0 m	40.00	21.04	1.50
	1.0 m × 1.1 m	40.00	21.06	1.10

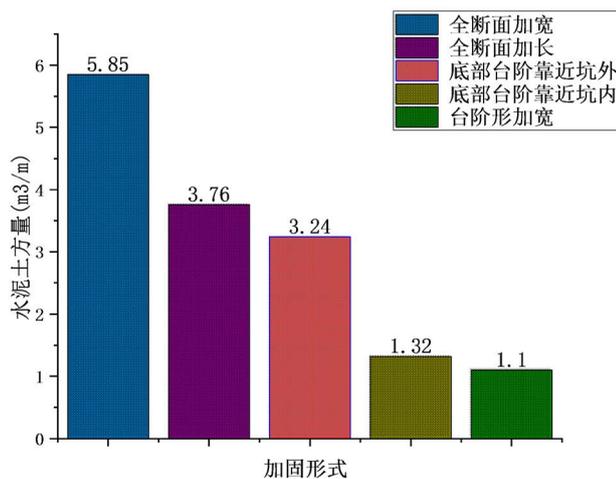


Figure 4. Economic comparison of reinforcement (column diagram)

图 4. 加固形式的经济性比较(柱状图)

4. 台阶长宽比对加固效果的影响

4.1. 验证加固方案适用性与经济性

通过对临界深度状态多开挖 0.1 m 工况展开分析, 得出台阶加宽、底部台阶靠近坑内两种围护加固方案为最优方案。本节对临界深度状态多开挖 0.2 m 工况展开分析, 验证两种方案适用性与经济性的同时, 初步探讨台阶长宽比改变对加固效果的影响。

在安全临界状态下多挖一层土, 以模拟实际工程中对已有基坑的再次深挖。当多挖 0.2 m 土(即开挖深度为 5.7 m)时, 重力式围护墙最大侧移增加为 62.03 mm, 基坑最大隆起量为 27.76 mm。此时基坑处于非安全状态, 需对其支护结构进行加强。由表 4、图 5 可以验证前文所述结论, 其中台阶形加宽的加固形式最为经济。

Table 4. Economic comparison of reinforcement forms—additional excavation 0.2 m
表 4. 加固形式的经济性比较——多开挖 0.2 m

加固形式	尺寸	水平侧移(mm)	垂直侧移(mm)	水泥土方量(m ³ /m)
全断面加宽	1.0 m × 11.7 m	31.94	20.68	11.70
全断面加长	4.7 m × 1.9 m	39.47	21.29	8.93
底部台阶靠近坑外	1.2 m × 5.0 m	38.87	27.79	6.00
底部台阶靠近坑内	1.2 m × 4.0 m	39.95	21.81	4.80
台阶形加宽	1.0 m × 3.1 m	39.87	21.91	3.10

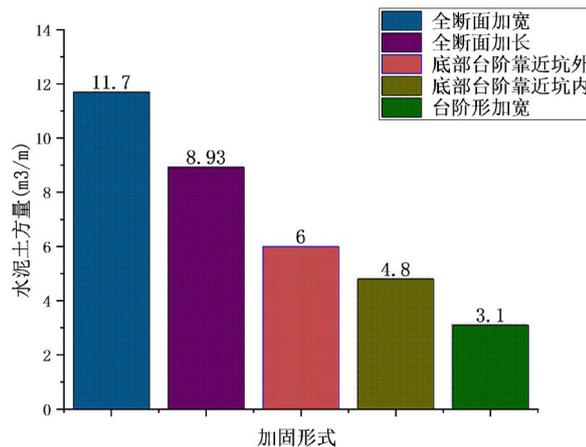


Figure 5. Economic comparison of reinforcement-additional excavation 0.2 m (column diagram)
图 5. 加固形式的经济性比较-多开挖 0.2 m (柱状图)

4.2. 探讨台阶长宽比对加固效果的影响

根据施工的模式, 坑底台阶宽度为 $(0.5n + 0.2)$ m, 加宽台阶宽度为 $(0.5n)$ m, 其中 $(n = 1, 2, 3, 4)$ 。分别计算相应宽度所对应的台阶的临界安全高度设计值, 计算得到表 5。

Table 5. Influence of step aspect ratio on reinforcement effect
表 5. 台阶长宽比对加固效果的影响

加固形式	尺寸	水平侧移(mm)	垂直侧移(mm)	水泥土方量(m ³ /m)	长宽比
底部台阶靠近坑内	1.2 m × 4.0 m	39.95	21.81	4.80	3.33
	1.7 m × 3.6 m	40.03	21.77	6.12	2.12
	2.2 m × 3.3 m	40.12	21.76	7.26	1.50
顶部台阶加宽	1.0 m × 3.1 m	39.87	21.91	3.10	3.10
	1.5 m × 1.6 m	39.92	21.92	1.50	1.03
	2.0 m × 0.7 m	39.23	21.78	1.40	0.35

根据表 5 可以得出, 台阶形加宽的加固效果略优于底部台阶靠近坑内。且靠近坑内底部台阶长宽比越大, 加固方式越经济; 而加宽的台阶长宽比越小, 加固方式越经济。其加固形式的经济效应与其台阶材料的利用效率密切相关, 其利用效率可从所受应力大致判断, 图 6、图 7 为重力式围护墙的剪应力云图。

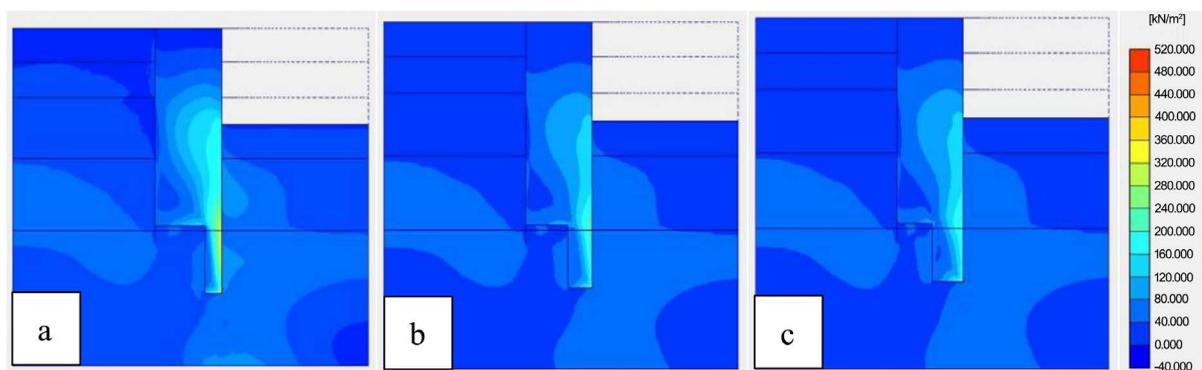


Figure 6. Shear stress cloud map of different size steps near the bottom of the pit
图 6. 不同尺寸靠近坑内底部台阶剪应力云图

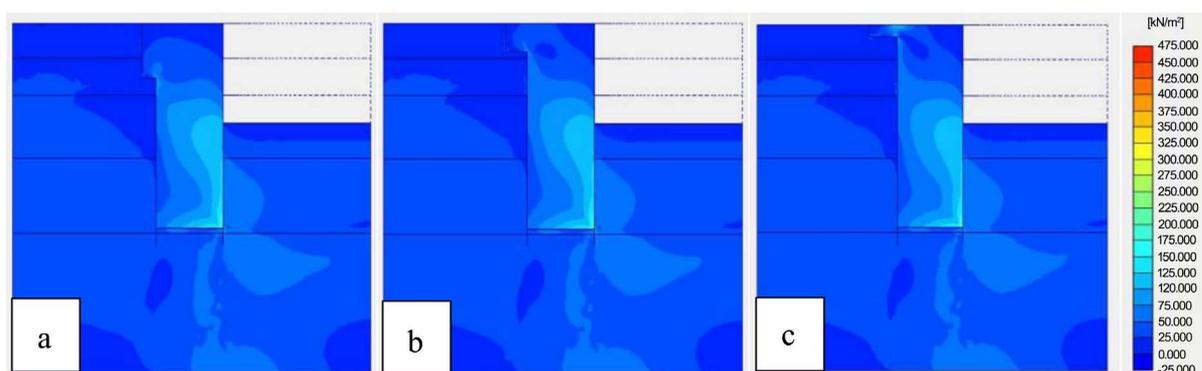


Figure 7. Shear stress cloud map of different size widening step
图 7. 不同尺寸加宽台阶剪应力云图

5. 结论

1) 本文通过反演法建立的模型以最大可能与实际围护墙顶最大水平位移拟合, 最终拟合结果较好, 可适用于复旦大学新江湾校区化学楼实际工程项目。

2) 台阶加宽、底部台阶靠近坑内两种围护墙加固形式较优, 较为经济性。其中, 靠近坑内底部台阶长宽比越大, 加固方式越经济; 加宽的台阶长宽比越小, 加固方式越经济。其中台阶加宽的加固形式最优, 但基坑加固方案设计时需考虑地表周边建筑物与基坑的距离。故应根据实际工程项目, 选择此两种中最经济、最适用的方案。

3) 本文提出的有限元反演方法在基坑工程中广泛适用, 对异型水泥土重力式围护墙的经济效益分析为基坑工程设计和现场施工提供了参考。

参考文献

- [1] 陈帅光, 林本海. 基坑开挖对地铁隧道及高架基桩的影响分析[J]. 土木工程, 2017, 6(1): 10-20.
- [2] 刘宗仁, 刘雪雁. 基坑工程[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2008.
- [3] 项向荣. 重力式围护墙支护结构变形分析[J]. 山西建筑, 2016, 42(11): 78-79.
- [4] 张玮鹏, 林本海. 基于岩土参数变化的大变形深基坑安全性分析[J]. 土木工程, 2018, 7(2): 255-269.
- [5] 苏怀智, 李季, 吴中如. 大坝及岩基物理力学参数优化反演分析研究[J]. 水利学报, 2007(S1): 129-134.
- [6] 孙钧, 黄伟. 岩石力学参数弹性反演问题的优化方法[J]. 岩石力学与工程学报, 1992, 11(3): 221-229+317.

- [7] 田明俊, 周晶. 土石坝土体参数反演的一种新方法[J]. 土木工程学报, 2005, 38(8): 118-122.
- [8] 杨玲, 龚爱民, 周斌, 彭玉林. 允楞水库大坝渗流异常特性有限元反演分析[J]. 水力发电, 2013, 39(7): 39-42.
- [9] 肖明清, 刘浩, 彭长胜, 巩生龙, 闫鹏飞. 基于神经网络的深厚软土地层参数反演分析[J]. 地下空间与工程学报, 2017, 13(1): 279-286.
- [10] 梁发云, 杨开彪, 李镜培. 上海规范重力式围护墙稳定性若干问题探讨[J]. 岩土力学, 2015, 36(S1): 199-203.
- [11] 况龙川, 高大钊. 上海软土基坑水泥土挡墙的可靠度指标研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 1998(6): 640-643.
- [12] 中国建筑科学研究院. JGJ120-2012 建筑基坑支护技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2326-3458, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>
期刊邮箱: hjce@hanspub.org