

## 深基坑开挖及渗流对邻近隧道的影响分析

刘飞飞<sup>1</sup>, 汪亦显<sup>1</sup>, 李凯<sup>2</sup>, 李娴<sup>1</sup>, 张伟<sup>1</sup>

(1. 合肥工业大学土木与水利工程学院, 安徽合肥 230009; 2. 合肥城市轨道交通有限公司, 安徽合肥 230009)

**摘要:** 为明确基坑开挖过程中邻近隧道的力学响应特征, 利用有限元数值模拟软件, 对隧道管片的变形和内力进行分析, 通过控制开挖过程中水头和水压力的变化, 分析基坑开挖过程中地下水渗流对邻近隧道的影响。结果表明: 基坑开挖会导致邻近隧道的变形和内力变化, 考虑地下水渗流作用时隧道的变形和内力会显著增加, 并且随着基坑开挖深度的增加, 隧道管片的变形和内力也随之增大。

**关键词:** 基坑开挖; 邻近隧道; 渗流; 数值分析

**中图分类号:** TU47

**文献标识码:** A

## Analysis of the influence of deep foundation pit excavation and seepage on adjacent tunnel

LIU Feifei<sup>1</sup>, WANG Yixian<sup>1</sup>, LI Kai<sup>2</sup>, LI Xian<sup>1</sup>, ZHANG Wei<sup>1</sup>

(1.School of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Anhui Hefei, 230009, China;

2.Hefei Rail Transit Group Co. Ltd., Anhui Hefei, 230009, China)

**Abstract:** In order to clarify the mechanical response characteristics of adjacent tunnels during excavation, the deformation and internal force of tunnel segments were analyzed by finite element numerical simulation software. The influence of groundwater seepage on adjacent tunnels during excavation was analyzed by controlling the change of water head and pressure during excavation. The results show that the excavation of foundation pit will lead to the deformation and internal force changes of adjacent tunnels. The deformation and internal force of the tunnel will increase significantly when the seepage of groundwater is considered. This study can provide a reference for evaluating the safety of adjacent tunnels and the design and construction of related projects.

**Key words:** foundation pit excavation; adjacent tunneling; seepage; numerical analysis

随着城市化进程的快速发展, 城市用地愈来愈紧张, 因此, 越来越多的深基坑工程修建在地铁隧道附近。深基坑工程因其开挖深度大、工程复杂成为影响邻近地铁安全运营的主要因素之一。近年来, 一些国内外的专家学者针对这一问题作了深入研究<sup>[1-3]</sup>。目前基坑开挖卸荷对既有地铁隧道的影响分析方法主要包括现场监测法<sup>[4-5]</sup>、解析法<sup>[6-8]</sup>、数值模拟法<sup>[9-11]</sup>和试验法<sup>[12]</sup>。上述方法在指导基坑开挖和评定隧道安全方面给出了有利指导, 但是也存

在一些不足。尽管上述专家学者在基坑开挖对地铁隧道的影响方面作了深入的研究, 但是并没有考虑降水引起的地下水渗流作用对隧道内力和变形的影响, 基坑开挖不可避免地要进行基坑降水, 而降水会对周围土体的变形有着很大的影响<sup>[13-15]</sup>。本文通过 MIDAS/GTS 建立基坑开挖渗流模型, 并将数值模拟结果与理论结合, 分析基坑开挖过程中渗流对邻近隧道的影响。

收稿日期: 2018-06-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51774107); 合肥市重点工程建设局科技支撑项目(2013CGAZ0771); 安徽省住房城乡建设厅科学技术计划项目(2013YF-27)

作者简介: 刘飞飞(1992-), 男, 安徽亳州人, 硕士, 主要从事岩土与隧道工程方面的研究工作。

### 1 工程概况

本工程位于合肥市云谷路和庐州大道交叉口, 毗邻合肥地铁1号线, 场地面积约为2400 m<sup>2</sup>, 基坑开挖深度为9 m, 设两层地下室, 采用0.8 m厚, 15.6 m深的地下连续墙作为围护结构和隔水措施, 隧道顶距地面约10 m, 待挖基坑与隧道的最小间距为7 m。由于待挖基坑位于地铁的一侧, 距右线地铁隧道的距离较远, 这里仅考虑基坑开挖对左线地铁隧道的影响。

根据钻探资料及室内土工试验结果, 将本工程勘探范围内的土层分为六个岩土分层, 各层土的物理力学参数如表1所示, 地下水位在地面以下3.0 m。

### 2 数值计算模型

为分析基坑开挖和渗流对既有地铁隧道的影响, 模型满足如下基本假定: (1) 各土层为均质、水平层状分布, 不考虑场地的起伏; (2) 含水层是水平的, 土层中的孔隙相互连通, 地下水运动服从达西定律; (3) 土层处于饱和状态, 模型采用土层饱和状态下的渗透系数; (4) 隧道衬砌、地下连续墙均为线弹性体, 土体为各向同性的理想弹塑性体。

考虑到M-C(Mohr-Coulomb)模型中土体只有单一弹性刚度, 不能反应土体卸荷的特性, 而修正M-C在M-C计算的基础上考虑了土体弹性卸载/再加载时的弹性模量, 能够更好地解决M-C模型中地面隆起变形和坑底土体隆起偏大的情况, 使计算结果符合基坑开挖变形特征。因此, 在建模时采用修正M-C模型, 根据大量工程经验, 有

$$黏性土 \quad E_{50}^{ref} = 2E_{oed}^{ref} \quad E_{ur}^{ref} = (4 - 5)E_{50}^{ref} \quad (1)$$

$$砂性土 \quad E_{50}^{ref} = E_{oed}^{ref} \quad E_{ur}^{ref} = 3E_{50}^{ref} \quad (2)$$

其中:  $E_{oed}^{ref}$ —单轴压缩参考刚度, 根据地质勘察报告的压缩模量选取;  $E_{50}^{ref}$ —排水三轴压缩参考刚度;  $E_{ur}^{ref}$ —卸载/再加载参考刚度。

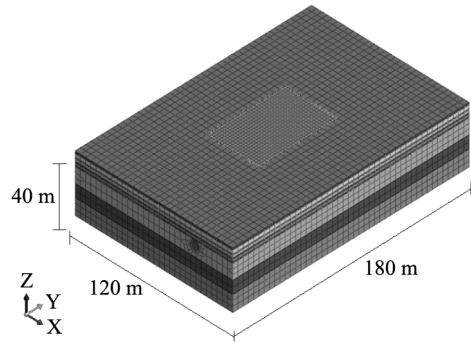


图1 三维有限元计算模型

Fig.1 Calculation model for finite element analysis

为了减少边界效应, 计算模型的尺寸取为180 m×120 m×40 m, 基坑开挖三维模型如图1所示。在不考虑渗流影响时, 模型两侧施加水平位移约束, 底部施加固定约束, 顶部保持自由面状态; 考虑渗流影响时, 模型边界不仅要考虑两侧的约束, 还要考虑初始水头和节点水头的边界, 其中初始水头为未开挖状态地下水的埋深, 节点水头为降水后的地下水位。土体和注浆采用实体单元模拟, 隧道管片、盾壳和地下连续墙采用板单元模拟, 地下连续墙和土通过接触面单元连接, 参数见表2、表3。

鉴于基坑开挖和渗流是一个连续动态的过程, 为了研究开挖深度和渗流对隧道的影响, 将基坑开挖过程分五次进行, 开挖后坑底距地面的距离分别为2.0、4.0、5.5、7.5、9.0 m; 基坑降水分四次进行, 降水后水位分别位于地面以下4.5、6.0、8.0、10.0 m, 在进行数值计算之前, 先对位移进行清零。

表1 土层物理力学参数

Tab.1 Physical and mechanical indices of soils

土层	重度 /(kN·m <sup>-3</sup> )	弹性模量 /MPa	泊松比	粘聚力 /kPa	内摩擦角 /°	厚度 /m	渗透系数 /(m·s <sup>-1</sup> )
填土	17.5	8	0.35	10	8	4	0.001
粘土1	19.9	10	0.3	40	12	1.5	0.000 6
粘土2	20	12	0.29	47	13	4.1	0.000 4
粘土3	20.1	14	0.26	50	12	12.3	0.000 4
全风化泥质砂岩	21	25	0.26	25	20	8.5	—
强风化泥质砂岩	21.5	23	0.24	30	25	—	—

表 2 结构计算参数

Tab.2 Parameters for structural computation

名称	弹性模量 /MPa	重度 /( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ )	泊松比	厚度 /m
管片	34 500	25	0.2	0.3
盾壳	20 000	78	0.3	0.05
注浆	10 000	25	0.2	0.06
连续墙	30 000	25	0.2	0.8

表 3 接触单元参数

Tab.3 Parameters for contact unit

名称	剪切刚度模量 /MPa	法向刚度模量 /MPa	粘聚力 /kPa	摩擦角 /°
接触单元	100	1 000	10	10

### 2.1 隧道位移分析

图 2 为基坑开挖过程中隧道管片的位移变形图，图中规定拱顶、拱底以隆起为正，沉降为负，隧道拱腰向基坑方向为正、反之为负。由图可知，随着基坑开挖深度的增加，隧道水平和竖向位移增大，在不同的位置，隧道产生的位移不同，主要因为基坑开挖过程中存在空间效应和角部效应，并对隧道和土体的变形具有阻碍作用，而在中间位置阻碍作

用较小，表现为中间变形大而两侧变形小。同时可知，在不考虑渗流作用时，隧道水平和竖向位移的影响范围距基坑开挖边界 40 m 左右，约为基坑沿隧道纵向开挖长度的 2/3，基坑开挖深度的 4 倍，考虑渗流作用时，隧道的水平和竖向位移影响范围将增大。

根据图 2(a)、(b) 可知，随着基坑开挖深度的增加，隧道左侧拱腰的水平位移逐渐增大，当开挖深度超过 7.5 m 时，位移变化值随开挖深度的增大影响不大。未考虑渗流作用影响时，隧道水平位移最大值为 3.13 mm；考虑渗流作用影响时，隧道的水平位移最大值为 11.2 mm。图 2(c)、(d) 为基坑开挖过程中隧道拱顶竖向位移图，其中图 2(c) 为未考虑渗流作用时隧道拱顶的竖向位移图，从图中可以看出，基坑开挖卸荷引起隧道上抬，当基坑开挖深度为 7.5 m 时，上抬位移达到最大值 0.78 mm；在此之后，随着基坑开挖深度的增加，隧道拱顶竖向位移有所降低，主要是因为基坑开挖卸荷，上部土压力减小，隧道和土体产生回弹而上抬；随着基坑开挖深度增大，基坑坑底隆起，围护结构产生向基坑水平方向的位移，土体向基坑内移动，引起隧道下沉。图 2(d) 为考虑渗流作用时隧道拱顶竖向位移曲线，

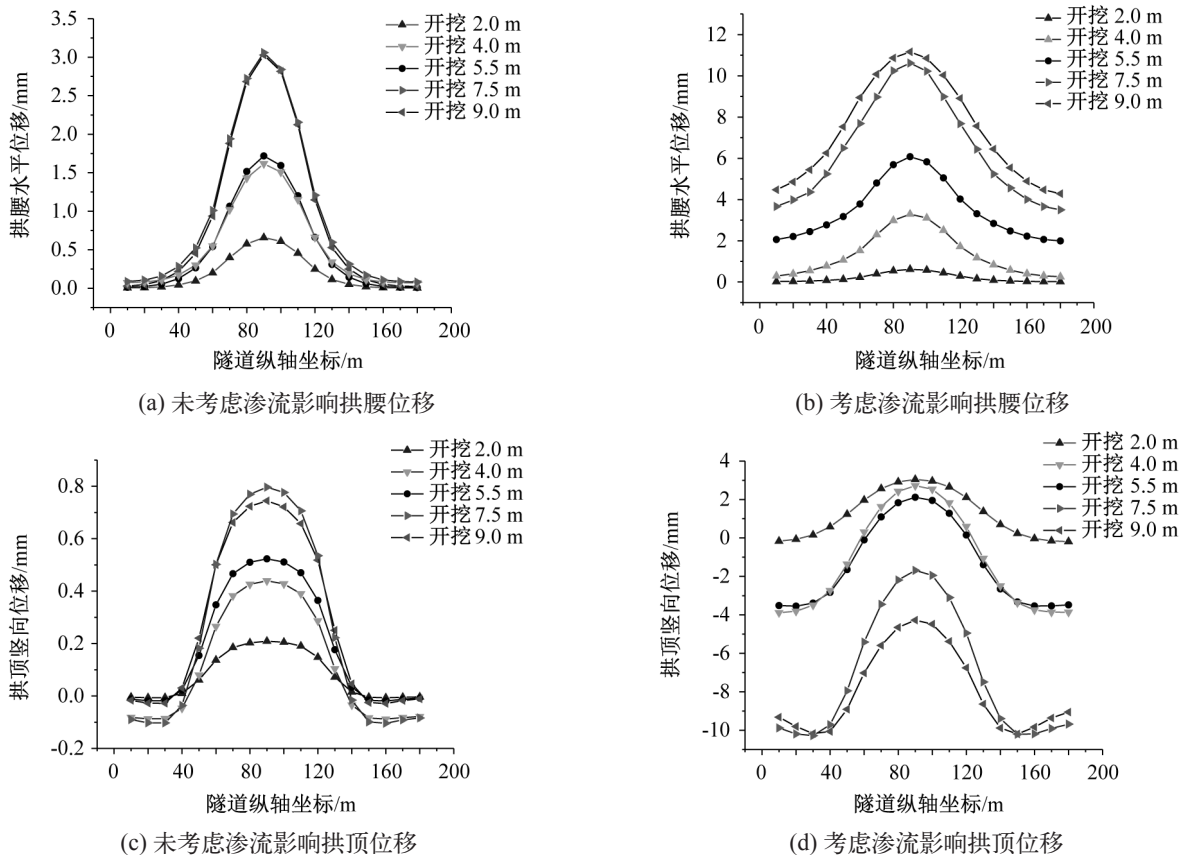


图 2 隧道水平、竖向位移变形图

Fig.2 Deformation of tunnel horizontal and vertical displacement

从图可知,当基坑开挖较浅时,隧道变形主要以上抬为主,随着开挖深度增加,基坑降水使周围土体的有效应力增大,导致隧道整体下沉,同时由于开挖卸荷的作用,隧道中间部位下沉相对较小。

图3为基坑开挖完成时,基坑开挖中间位置处隧道左拱腰与右拱腰、隧道拱顶与拱底的变形差值,差值越大说明隧道截面越不规则。从图中可知,基坑开挖使隧道截面发生不规则变形,且变形量与隧道的位移变形具有一致性,隧道横向和竖向位移差值分别为2.75 mm和1.98 mm,表现为向基坑内侧

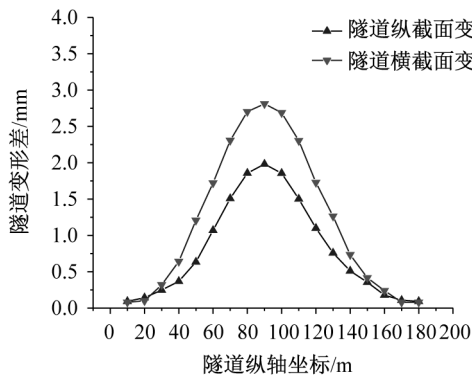


图3 隧道横纵向变形差

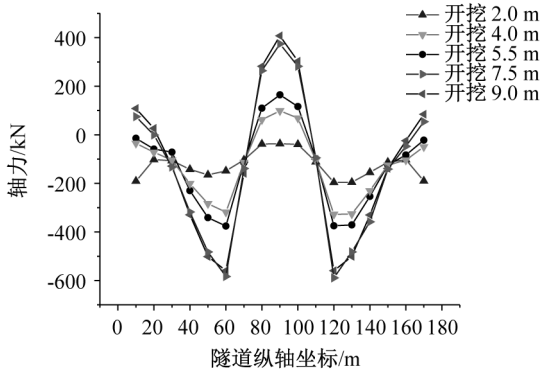
Fig.3 Tunnel horizontal and vertical deformation difference

的水平变形和竖向的压缩变形。

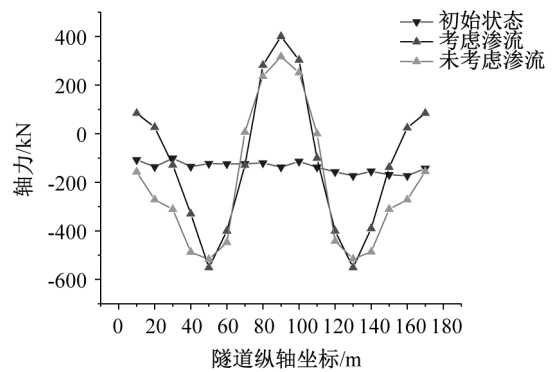
### 2.2 隧道内力分析

基坑开挖卸荷破坏了土体初始平衡,从而使地铁隧道的初始平衡发生改变,为了分析基坑开挖对隧道结构内力的影响,选取基坑开挖影响较大的隧道左侧拱腰轴力和弯矩作为研究对象。图4(a)和(c)为考虑渗流作用时基坑开挖过程中隧道左侧拱腰沿线轴力和弯矩的分布曲线,从图中可知,随着基坑开挖深度的增加,基坑开挖影响范围内隧道管片的轴力和弯矩逐渐增加,并且当基坑开挖超过一定深度时,隧道管片轴力值和弯矩值出现骤增现象,轴力和弯矩在基坑开挖中间部位存在极值,极值点位置轴力和弯矩分别为401.6 kN和104.8 kN·m;在基坑两侧轴力和弯矩逐渐降低,同时应注意到由于基坑开挖卸荷的作用,隧道轴力在基坑边界存在突变现象,突变后的轴力值为-585.2 kN,约为最大正弯矩的1.46倍。

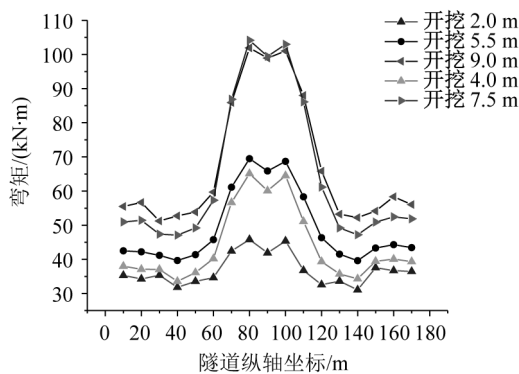
图4(b)与(d)为基坑开挖过程中未考虑渗流作用和考虑渗流作用时的管片轴力和弯矩对比图。从图中可知,考虑渗流作用时,隧道管片的轴力



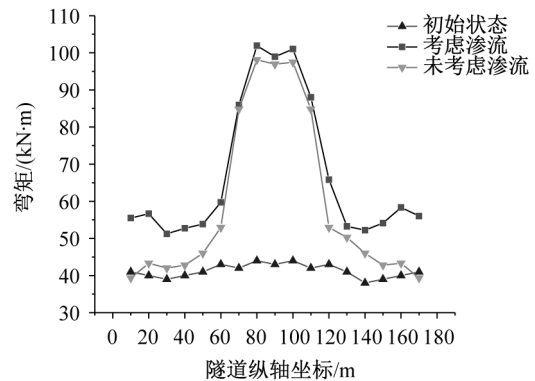
(a) 考虑渗流影响时拱腰轴力



(b) 隧道拱腰轴力



(c) 考虑渗流影响时拱腰弯矩



(d) 隧道拱腰弯矩

图4 隧道拱腰内力图

Fig.4 The tunnel arch waist force diagram

和弯矩均有所增大,轴力最大值由 310.7 kN 增加到 401.6 kN,增大幅度约为 29.3%,弯矩最大值由 97.1 kN·m 增加到 103.3 kN·m,增大幅度为 6.4%,可见考虑渗流作用对隧道管片轴力有显著的影响,而对隧道管片弯矩影响不大。由于管片受到偏心受压的状态,基坑开挖引起的管片轴力和弯矩的增大将加剧管片偏心程度,对隧道结构安全产生不利影响。

### 2.3 地表沉降分析

基坑开挖卸荷过程中,原有的土体应力发生变化,应力路径也变得更加复杂,土颗粒由于主应力的变化会向基坑开挖方向移动,由此导致基坑周围地表产生沉降。

图 5 为基坑开挖引起平行于隧道方向地表最终沉降,随着距离围护结构的距离增大,地表沉降出现先增大后减小的现象,主要因为围护结构整体刚度大,土体与围护结构相互作用,限制土体下沉,随着距离的增加,相互作用减弱,土层沉降增大;当距离增加到一定程度时,基坑开挖产生的影响减弱,地表沉降减小;同时可以看出,在不考虑渗流作用时,地表沉降最大值为 4.2 mm,考虑渗流作用时,地表沉降最大值为 6.14 mm,沉降增加了 46.2%,主要由于渗流导致有效应力增加,加速土层固结沉降,因此考虑渗流作用时的沉降要比不考虑渗流作用时的沉降要大。

## 3 结论

1) 基坑开挖具有明显的时空效应和角部效应,在基坑中间部位,隧道的变形和内力变化较大,随

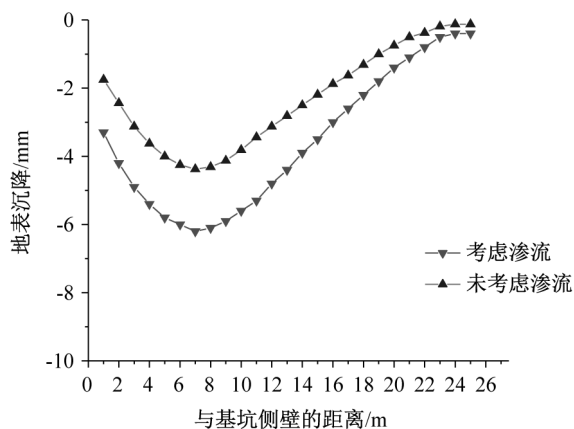


图 5 基坑周围地表沉降

Fig.5 The ground settlement around deep foundation pit

着距离的增加开挖卸荷造成影响逐渐减弱,在基坑开挖的边界隧道内力存在突变现象。

2) 基坑开挖降水引起的渗流对隧道的变形和内力有显著的影响,考虑渗流作用时,隧道左拱腰的水平位移增大了 2.58 倍,管片轴力和弯矩分别增大了 29.3% 和 6.4%。渗流作用对隧道的水平位移和管片的轴力有较大的影响,相对而言对管片的弯矩影响较小。

3) 未考虑渗流作用影响时,基坑开挖卸荷对隧道的影响范围约为基坑开挖长度的 2/3,基坑开挖深度的 4 倍;考虑渗流影响时,由于土层有效应力增大,基坑开挖卸荷对隧道的影响范围将增大;同时,开挖降水引起的土层固结加大了地表沉降,使地表沉降最大值从 4.2 mm 增加到 6.14 mm,增大 46.2%。

### 参考文献:

- [1] 郝东雷, 关英斌, 张立钊, 等. 毗邻地铁隧道深基坑支护方案研究 [J]. 河北工程大学学报: 自然科学版, 2013, 30(3): 104-108.
- [2] DOLEZALOV M, AACUTE. Tunnel complex unloaded by a deep excavation [J]. Computers and Geotechnics, 2001, 28(6): 469-493.
- [3] ABDEL-MEGUID M, ROWE R K, LO K Y. 3D effects of surface construction over existing subway tunnels [J]. International Journal of Geomechanics, 2002, 2(4): 447-469.
- [4] 肖同刚. 基坑开挖施工监控对临近地铁隧道影响分析 [J]. 地下空间与工程学报, 2011, 7(5): 1013-1017.
- [5] 李志高, 刘浩, 刘国彬, 等. 基坑开挖引起下卧隧道位移的实测分析 [J]. 地下空间与工程学报, 2005, 1(4): 619-623.
- [6] 梁荣柱, 林存刚, 夏唐代, 等. 考虑隧道剪切效应的基坑开挖对邻近隧道纵向变形分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(1): 223-233.
- [7] 张治国, 张孟喜, 王卫. 基坑开挖对临近地铁隧道影响的两阶段分析方法 [J]. 岩土力学, 2011, 32(7): 2085-2092.
- [8] 周泽林, 陈寿根, 涂鹏, 等. 基坑开挖对邻近隧道影响的耦合分析方法 [J]. 岩石力学, 2017, 38(12): 1001-1011.
- [9] 张建新, 王传庆, 栾开云. 基坑开挖对邻近既有下卧隧道的影响分析 [J]. 河北工程大学学报: 自然科学版, 2012, 29(3): 23-26.
- [10] 杨宝珠, 仲晓梅. 基于 FLAC-3D 的 (下转第 69 页)

- [2] 赵永宏, 邓祥征, 战金艳, 等. 我国湖泊富营养化防治与控制策略研究进展 [J]. 环境科学与技术, 2010(3): 92-98.
- [3] DUAN H T, MAR R H, ZHANG Y Z, et al. A new three-band algorithm for estimating chlorophyll concentrations in turbid inland lakes [J]. Environmental Research Letters, 2010, 5(4): 44009.
- [4] 史锐, 张红, 岳荣, 等. 基于小波理论的干旱区内陆湖泊叶绿素 a 的 TM 影像遥感反演 [J]. 生态学报, 2017(3): 1043-1053.
- [5] BRESCIANI M, GIARDINO C, STROPPIANA D, et al. Retrospective analysis of spatial and temporal variability of chlorophyll-a in the Curonian Lagoon [J]. Journal of Coastal Conservation, 2012, 16(4): 511-519.
- [6] WATANABE F S, ALCANTARA E, RODRIGUES T W, et al. Estimation of Chlorophyll-a Concentration and the Trophic State of the Barra Bonita Hydroelectric Reservoir Using OLI/Landsat-8 Images [J]. Int J Environ Res Public Health, 2015, 12(9): 10391-10417.
- [7] 郑震. 基于 OLI 遥感影像的叶绿素 a 质量浓度反演研究 [J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(3): 89-93.
- [8] 李云亮, 张运林. 基于 TM 影像的太湖夏季悬浮物和叶绿素 a 浓度反演 [J]. 遥感信息, 2008(6): 22-27.
- [9] SUN D, LI Y, WANG Q. A Unified Model for Remotely Estimating Chlorophyll a in Lake Taihu, China, Based on SVM and In Situ Hyperspectral Data [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2009, 47(8): 2957-2965.
- [10] 金相灿, 刘鸿亮, 屠清瑛. 中国湖泊富营养化 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.

(责任编辑 王利君)

(上接第 54 页)

- 变形分析 [J]. 岩土工程学报, 1992, 14(5): 70-75.
- [3] 张迎春, 刘吉福, 魏金霞. 砂井地基主、次固结度粘弹性分析 [J]. 水运工程, 2003, 355(8): 20-24.
- [4] 廖红建, 苏立君, 白子博明, 等. 次固结沉降对压缩时间曲线的影响研究 [J]. 岩石力学, 2002, 23(5): 636-640.
- [5] 殷宗泽, 张海波, 朱俊高, 等. 软土的次固结 [J]. 岩土工程学报, 2003, 25(5): 521-526.
- [6] CHAI J C, MIURA N. Traffic-load-induced permanent deformation of road on soft subsoil [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2002, 128(11): 907-916.
- [7] BJERRUM L. Embankments on soft ground [C]// Proceedings of the Specialty Conference on Performance of Earth and Earth-supported Structures. Purdue University: ASCE, 1972: 1-54.
- [8] 李国维, 胡坚, 陆晓岑, 等. 超固结软黏土一维蠕变次固结系数与侧压力系数 [J]. 岩土工程学报, 2012, 34(2): 2198-2205.
- [9] 余湘娟, 殷宗泽, 董卫军. 荷载对软土次固结影响的试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2007, 29(6): 913-916.
- [10] 周秋娟, 陈晓平. 软土次固结特性试验研究 [J]. 岩土力学, 2006, 27(3): 404-408.

(责任编辑 王利君)

(上接第 59 页)

- 深基坑开挖过程数值分析 [J]. 河北工程大学学报: 自然科学版, 2008, 25(3): 15-18.
- [11] 李晶晶, 程祖锋, 耿立立, 等. 基于 FLAC3D 的复合土钉支护数值模拟分析 [J]. 河北工程大学学报: 自然科学版, 2011, 28(3): 5-8.
- [12] 张玉伟, 谢永利, 翁木生. 非对称基坑开挖对下卧地铁隧道影响的离心试验 [J]. 岩石力学, 2018, 39(7): 1-8.
- [13] 金小荣, 俞建霖, 祝哨晨, 等. 基坑降水引起周围土体沉降性状分析 [J]. 岩土力学, 2005, 26(10): 1575-1581.
- [14] 杨清源, 赵伯明, 孙凤伯, 等. 潜水层基坑降水引起地表沉降试验与理论研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(10): 1-14.
- [15] 刘历波, 王晓磊, 史三元. 基坑开挖过程中地下水渗流数值模拟 [J]. 河北工程大学学报: 自然科学版, 2013, 30(3): 13-16.

(责任编辑 王利君)