

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2023.04.015

超固结比对合肥硬黏土剪胀特性的影响研究

陈贺欣¹, 陆国², 沈银斌³, 杨成斌¹, 王杰¹

(1. 合肥工业大学资源与环境工程学院, 安徽合肥 230009; 2. 金科地产华东大区浙江公司, 浙江杭州 311200; 3. 机械工业勘察设计研究院有限公司安徽分公司, 安徽合肥 230051)

摘要:为了定量探讨超固结比(overconsolidation ratio, OCR)对合肥硬黏土剪胀性的影响, 文章对合肥地区原状硬黏土进行三轴剪胀试验, 并与重塑土试验结果进行对照; 制备超固结比分别为1、2、4、8的重塑土进行三轴对比试验。结果表明: OCR为2.70~4.68的原状土, 其最大体积剪胀率为1.1%~3.0%, 在一定范围内, OCR与最大体积剪胀率呈抛物线关系; 重塑土与同深度原状土相比, 最大体积剪胀率降低33.3%~36.4%, 且部分土样出现先剪缩后剪胀的现象; 与原状土相比, OCR越大, 重塑土的剪胀性降低程度越大, 重塑土样的最大体积剪胀率降低5%~51%, 在一定范围内, 重塑土OCR与最大体积剪胀率之间存在较强线性关系。

关键词:合肥硬黏土; 剪胀性; 三轴试验; 超固结比(OCR); 体积剪胀率

中图分类号: TU411.2; TU442 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-5060(2023)04-0529-06

Study on the effect of overconsolidation ratio on dilatancy characteristics of Hefei hard clay

CHEN Hexin¹, LU Guo², SHEN Yinbin³, YANG Chengbin¹, WANG Jie¹

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Zhejiang Company of Jinke Real Estate in East China, Hangzhou 311200, China; 3. Anhui Branch, China Jikan Research Institute of Engineering Investigation and Design Co., Ltd., Hefei 230051, China)

Abstract: In order to quantitatively explore the effect of overconsolidation ratio(OCR) on the dilatancy of Hefei hard clay, a triaxial dilatancy test was carried out on the undisturbed hard clay in Hefei area, and the results were compared with those of the remoulded soil. It shows that the maximum volume dilatancy rate of the undisturbed soil with an OCR of 2.7-4.68 is 1.1%-3.0%. Within a certain range, the OCR has a parabolic relationship with the maximum volume dilatancy rate. The maximum volume dilatancy rate of the remoulded soil is reduced by 33.3%-36.4% compared with that of the undisturbed soil, and some soil samples show the phenomenon of shear shrinkage before dilatancy. In addition, remoulded soils with OCRs of 1, 2, 4, and 8 were prepared for triaxial comparison tests. The test results show that the greater the OCR, the greater the reduction in the dilatancy of the remoulded soil, compared with that of the undisturbed soil. The maximum volume dilatancy rate of the remoulded soil is reduced by 5%-51%. Within a certain range, there is a strong linear relationship between the OCR and maximum volume dilatancy rate of the remoulded soil.

Key words: Hefei hard clay; dilatancy; triaxial test; overconsolidation ratio (OCR); volume dilatancy rate

收稿日期: 2021-01-11; 修回日期: 2022-12-31

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41972278)

作者简介: 陈贺欣(1992—), 男, 河北保定人, 合肥工业大学硕士生;

沈银斌(1983—), 男, 浙江余姚人, 博士, 机械工业勘察设计研究院有限公司正高级工程师, 硕士生导师, 通信作者, E-mail: yinbinshen@163.com;

杨成斌(1962—), 男, 安徽滁州人, 合肥工业大学教授, 硕士生导师。

近年来,随着经济快速发展、城市规模扩大,出现了越来越多的高层、超高层建筑,这对基础承载力建设提出更高的要求。土的剪胀性在高层、超高层建筑的基础设计和施工中是不可忽视的影响因素,预制桩施工中引起的显著地表隆起和邻近桩体倾斜与断裂,均与土的剪胀性密切相关。

关于土体的剪胀性,相关研究成果较丰富。针对砂性土及粗粒土,文献[1]通过分析主应力方向对砂土剪胀性的影响,提出含有主应力方向的状态参量,并建立相应的剪胀方程;文献[2]开展不同固结方式、不同应力路径、不同围压下的三轴压缩试验,探究砂土在不同条件下的剪缩、剪胀变化规律及剪胀性变化趋势;文献[3]通过实验探讨围压、母岩性质、密度及应力路径等因素对粗粒土剪胀性的影响;文献[4]研究低围压至高围压范围内,砂土相对密度和围压对土体强度和变形特性的影响。在黏性土方面,文献[5]针对超固结饱和黏性土,提出能够反映不同超固结比(overconsolidation ratio,OCR)下土的变形、剪胀、孔隙水压力变化特性和规律的本构模型;文献[6]研究OCR对海相沉积软黏土热固结特性的影响,拟合得到考虑OCR影响的热固结经验关系式;文献

[7]研究不同OCR及不同含砂量对重塑土体剪胀特性的影响;文献[8]研究不同OCR和应力速率对膨胀土卸荷力学特性的影响。针对合肥硬黏土,文献[9-10]分析不同OCR土体的抗剪强度、剪切指标等规律。

上述剪胀性研究大多是针对砂土和粗颗粒土,对于硬黏土这种结构性土的剪胀性研究较少,且针对不同OCR原状土样与重塑土样的对比研究较少。合肥硬黏土在历史上由于地质运动产生的卸荷作用,土层的前期固结压力大于现覆土层压力,具有典型的超固结性。本文通过三轴剪胀试验,分析合肥地区典型硬黏土的剪胀性与OCR的关系,并与重塑土进行对比分析;通过制备不同OCR扰动土样,分析重塑对剪胀特性的影响。

1 试验内容与方案

1.1 试样制备

原状土样取自合肥肥西金田产业园区典型硬黏土地区。采用环刀切土取样,并对采集的试样开展基本物理性质实验,得到原状硬黏土基本物理力学性能参数取值,见表1所列。表1中,密度、干密度的单位为 g/cm^3 。

表1 原状硬黏土基本物理力学性能参数取值

取土深度/m	含水率/%	密度	干密度	相对密度	孔隙比	饱和度/%	液限/%	塑限/%	塑性指数/%	液性指数/%	压缩系数/ MPa^{-1}	压缩模量/MPa	黏聚力/kPa	内摩擦角/ $^\circ$
3.0~3.2	24.2	1.91	1.54	2.73	0.775	85	37.9	19.8	18.1	0.24	0.25	7.10	67.1	11.8
3.2~3.4	23.8	1.91	1.56	2.73	0.755	82	38.1	19.9	18.2	0.16	0.18	9.75	69.3	13.2
8.0~8.2	24.2	1.95	1.57	2.73	0.739	89	39.7	20.4	19.3	0.20	0.14	12.42	82.2	13.7
12.0~12.2	24.6	1.98	1.61	2.74	0.707	95	44.9	22.1	22.8	0.11	0.11	15.52	92.2	12.0

重塑土采用分层击实法制备,击实桶内径与试样直径相同,击锤直径略小于桶内径。根据设计要求的干密度和含水率确定所需湿土质量,分6层依次倒入击实桶内,并分层击实,达到最大压实效果;击实结束后,将试样两端整平。为确保不同试样的压实性保持一致,要确保土的含水率、锤击次数、筛选粒径和分层厚度等保持一致,以取土深度12 m的基本物理性质进行控制。重塑土的基本物理性质如下:含水率为24.6%,干密度为 $1.61 \text{ g}/\text{cm}^3$,孔隙比为0.707。

1.2 试验方案

试验采用TSZ-1型应变式三轴试验仪,试样尺寸(直径×高度)为 $39.1 \text{ mm} \times 80.0 \text{ mm}$,共4组土样,其中3组为原状土样(编号为1、2、3),1组为扰动重塑土样(编号为4)。原状土样每组

分别包括取土深度为3、8、12 m的3个土样。扰动重塑土样取土深度均为12 m,为保证重塑土与原状土的对应关系,在原状土试样试验后,用该原状土制备重塑土样,并尽量控制其基本物理性质与原状土一致,重塑土的压实效果接近原状土的密实度,以此与原状土样进行对比试验。重塑硬黏土试样图片如图1所示。

本次试验为不固结不排水三轴剪切试验,试样采用抽气饱和法,剪切速率为 $0.3 \text{ mm}/\text{min}$,围压为150 kPa。共4组试验,其中1组为重塑土对比试验。

OCR是表达超固结性的一个重要参数,研究合肥硬黏土OCR与剪胀性之间的关系,需要确定硬黏土的OCR(R_{oc}),计算公式为:

$$R_{oc} = p_c/p_0 \quad (1)$$

其中: p_c 为土层前期固结压力; p_0 为土层自重压力。本文根据室内固结试验的 $e-\lg p$ 曲线(e 为孔隙比, p 为土层压力)确定 p_c 值。试验方案见表 2 所列。



图 1 重塑硬黏土试样图片

表 2 三轴剪切试验方案

土样编号	土样类别	取土深度/m	围压/kPa	OCR
1-1	硬黏土	3	150	4.68
1-2	硬黏土	3	150	4.43
1-3	硬黏土	3	150	4.59
2-1	硬黏土	8	150	3.85
2-2	硬黏土	8	150	3.78
2-3	硬黏土	8	150	3.54
3-1	硬黏土	12	150	2.88
3-2	硬黏土	12	150	2.70
3-3	硬黏土	12	150	2.83
4-1	重塑土	12	150	
4-2	重塑土	12	150	
4-3	重塑土	12	150	

为了进一步分析初始结构对合肥硬黏土剪胀性的影响,制备 OCR 分别为 1、2、4、8 的重塑硬黏土试样,对应 p_c/p_0 值分别为 800/800、800/400、800/200、800/100。

重塑土制备与试验方法如下:将土样加载到需要的较高荷载 800 kPa,排水固结,用于产生土的前期固结压力,然后逐级降低围压,达到预定的剪切围压,制备 OCR 分别为 1、2、4、8 的土样;试样的每级荷载固结时间为 2 d,等向固结完成后,对试样开始轴向剪切,剪切速率为 0.002 mm/min。

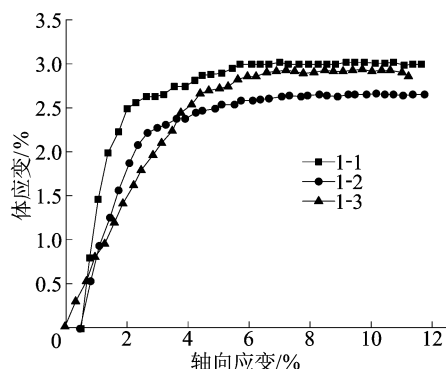
2 试验结果与分析

2.1 原状土与重塑土对比分析

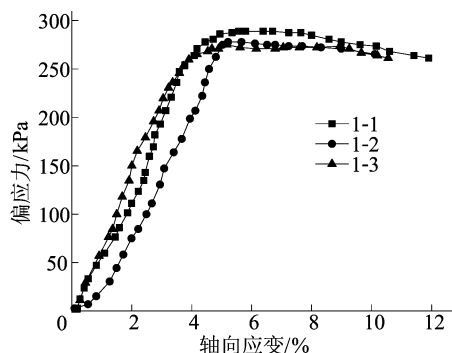
4 组试样体积剪胀率(体应变)、偏应力随轴向应变的变化曲线分别如图 2~图 5 所示。

由图 2~图 4 可知,随着轴向应变增大,体应变、偏应力在初始阶段呈线性增长,最终趋于稳定。从图 2 可以看出,取土深度 3 m 的原状土试

样 OCR 值为 4.43~4.68,最大体积剪胀率(体应变)为 2.5%~3.0%,对应的轴向应变趋于 5%,偏应力最终稳定在 270~280 kPa 范围。

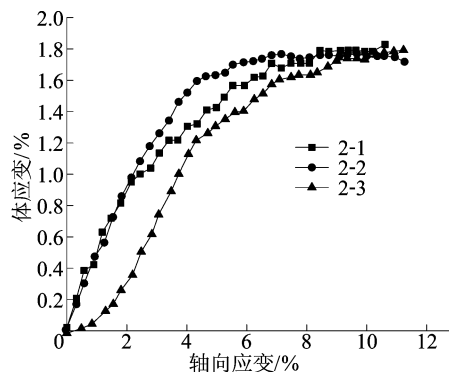


(a) 体应变-轴向应变曲线

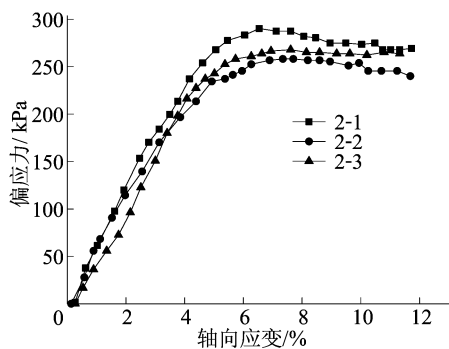


(b) 偏应力-轴向应变曲线

图 2 第 1 组试样体积剪胀率、偏应力随轴向应变变化曲线



(a) 体应变-轴向应变曲线



(b) 偏应力-轴向应变曲线

图 3 第 2 组试样体积剪胀率、偏应力随轴向应变变化曲线

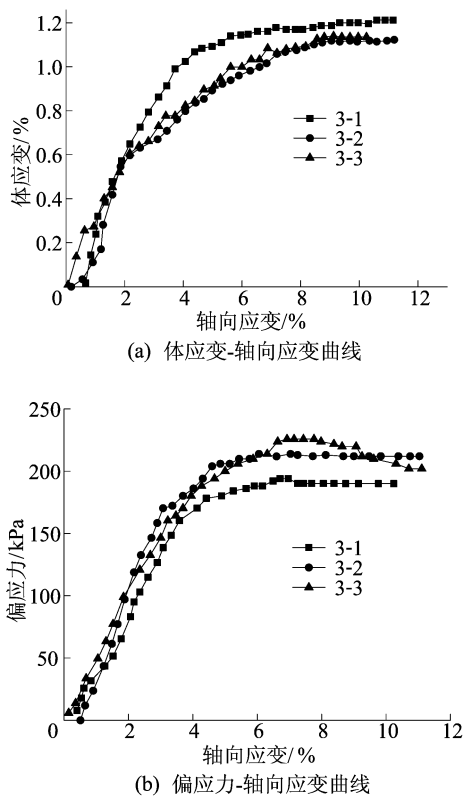


图 4 第 3 组试样体积剪胀率、偏应力随轴向应变变化曲线

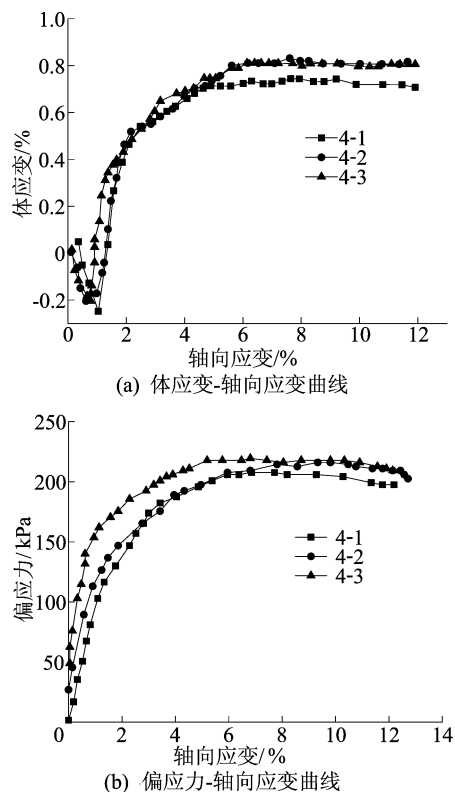


图 5 第 4 组试样体积剪胀率、偏应力随轴向应变变化曲线

从图 3 可以看出,取土深度 8 m 的原状土试样 OCR 值为 3.54~3.85,最大体积剪胀率(体应变)为 1.7%~1.8%,对应的轴向应变趋于 7%,

偏应力最终稳定在 250~270 kPa 范围。

从图 4 可以看出,取土深度 12 m 原状土试样 OCR 值为 2.70~2.88,最大体积剪胀率(体应变)为 1.1%~1.2%,对应的轴向应变趋于 8%,偏应力最终稳定在 190~210 kPa 范围。

从图 5 可以看出,第 4 组试样为重塑土(以取土深度为 12 m 土样的基本物理性质进行控制),扰动试样受偏应力的作用,剪切初期先发生剪缩,后转为剪胀,最大体积剪胀率(体应变)为 0.7%~0.8%,与同深度原状土试样相比,最大体积剪胀率降低 33.3%~36.4%,偏应力最终稳定在 200 kPa 左右。由此可见,扰动土破坏了原状土体的原始致密结构,剪胀效应明显降低。

通过对比取自不同深度的原状土样三轴试验结果发现,土样的 OCR 越大,剪胀性越大,且有较强的相关性;OCR 越小的土体,达到最大体积剪胀率时所对应的轴向应变越大,反之则越小。

对原状土样最大体积剪胀率(体应变)和 OCR 数据进行拟合,结果如图 6 所示。

由图 6 拟合曲线得到体应变 ϵ_v 与 OCR 的关系式为:

$$\epsilon_v = 0.37x^2 - 1.81x + 3.37 \quad (2)$$

其中, x 为 OCR。根据(2)式可得,在一定范围内,OCR 与最大体积剪胀率(体应变)呈抛物线关系曲线,拟合效果 $R^2=0.99$ 。这说明在一定条件下,OCR 与最大体积剪胀率具有较强的相关性。

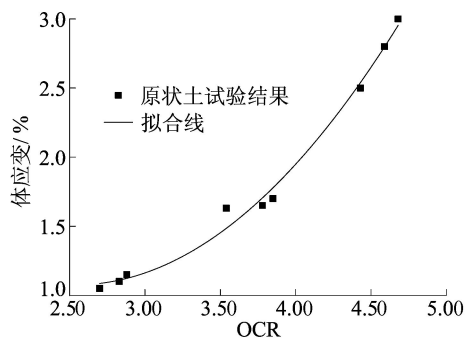


图 6 原状土最大体积剪胀率-OCR 关系拟合曲线

2.2 不同 OCR 重塑土对比分析

为了进一步分析初始结构对剪胀性的影响,制备 OCR 分别为 1、2、4、8 的重塑硬黏土试样,进行对比分析,试验结果如图 7、图 8 所示。

由图 8a 可知:OCR 为 1 的土样只有剪缩现象,最大体应变为 -2.70%;OCR 为 2 的土样出现先剪缩后剪胀的现象,剪胀现象不明显,最大体应变为 0.27%;OCR 为 4 时,土样只有剪胀现象,

最大体应变为 1.67%,OCR 为 8 时,土样同样只有剪胀现象,最大体应变为 7.30%。由此可见,随着 OCR 增大,最大体积剪胀率(体应变)也不断增大。

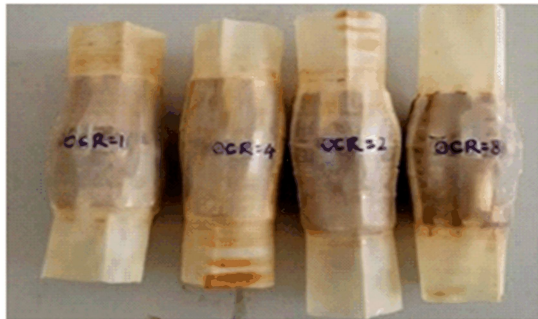
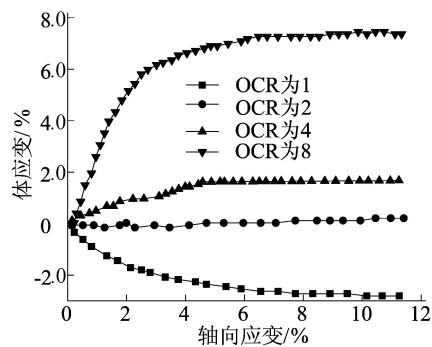
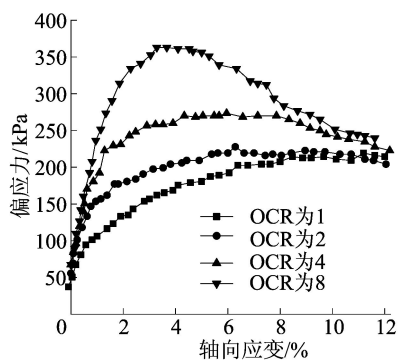


图 7 不同 OCR 重塑硬黏土破坏后的状态图片



(a) 体应变-轴向应变曲线



(b) 偏应力-轴向应变曲线

图 8 不同 OCR 重塑土样体积剪胀率、偏应力随轴向应变的变化

由图 8b 可知,OCR 为 1 时,土体偏应力随轴向应变增大而不断增加,最终趋近于 200 kPa;OCR 为 2 时,土体偏应力增大到 200 kPa 后又逐渐降低,最终趋于 200 kPa;OCR 为 4 时,土体偏应力增大到 260 kPa 左右,在轴向应变 8% 左右开始降低,而 OCR 为 8 时,土体偏应力增大到 350 kPa 左右开始减小,最终都趋于 200 kPa。由此可见,OCR 小于 2 的土体,只发生应变硬化现象,而 OCR 大于 2 的土体,出现应变软化现象,由此推断 OCR 为 2 是发生应变硬、软化转变的临界点。

对上述不同 OCR 重塑土样的试验结果作线性相关性分析,发现 OCR 与最大体积剪胀率(体应变)存在一定的线性相关,如图 9 所示。

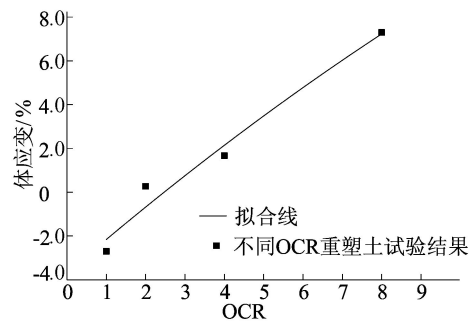


图 9 不同 OCR 重塑土样体积剪胀率-OCR 关系曲线

拟合关系式为:

$$\epsilon_v = 1.34x - 3.37 \quad (3)$$

其中, x 为 OCR。拟合效果 $R^2 = 0.97$ 。

由(3)式可知,OCR 与最大体积剪胀率表现出良好的相关性。将原状土样的 OCR 值代入(2)式得到原状土的体积剪胀率,并与重塑土体积剪胀率相比较,发现重塑土样的体积剪胀率降低 5%~51%,并且 OCR 越大,重塑土的体积剪胀率降低程度越明显,这是由于重塑过程中破坏了土颗粒原来的致密结构,增大了颗粒间的孔隙。

合肥地区硬黏土的 OCR^[11] 为 1.70~7.50,平均值约为 3.00,硬黏土地区施工地连墙或送桩时,土体受到大范围的剪切破坏,会产生显著的体积膨胀,OCR 越大的土体,产生的体积剪胀率就越大,给工程带来很大影响,如桩体倾斜、地表隆起、基坑隆起等。

3 结 论

(1) 在一定范围内,OCR 越小的硬黏土,达到最大体积剪胀率(体应变)时对应的轴向应变越大;反之则越小。

(2) 同源同深度重塑土与原状土相比,重塑土体的原结构受到破坏,重塑土的最大体积剪胀率降低 33.3%~36.4%。

(3) 对于合肥硬黏土,在一定范围内,原状土的 OCR 与最大体积剪胀率(体应变)呈抛物线相关关系,且 OCR 越大,剪胀性越大。

(4) 重塑土 OCR 与最大体积剪胀率(体应变)存在一定的线性相关;与原状土相比,重塑土样的体积剪胀率降低 5%~51%,且 OCR 越大,重塑土的体积剪胀率降低程度越大。

[参 考 文 献]

- [1] 刘鹏, 栾茂田, 王忠涛. 主应力方向对砂土剪胀性的影响分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(3): 667-673.
- [2] 卢真辉, 戚承志, 姜宽, 等. 砂土剪胀特性的试验研究[J]. 实验室研究与探索, 2020, 39(4): 19-24, 49.
- [3] 叶洋帆, 赵志元, 褚福永. 粗粒料剪胀性影响因素分析研究[J]. 丽水学院学报, 2018, 40(5): 64-68.
- [4] GU L L, WANG Z, HOSOYA A H, et al. Dilatancy and liquefaction behaviour of clean sand at wide range of confining stresses[J]. Journal of Central South University, 2020, 27(8): 2394-2407.
- [5] 胡小荣, 董肖龙, 陈晓宇, 等. 超固结饱和黏性土的弹塑性本构模型及三轴试验模拟[J]. 应用力学学报, 2018, 35(1): 28-35.
- [6] 刘铨, 邓岳保, 毛伟赞, 等. 超固结比对黏土热固结特性的影响研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2019, 39(4): 607-614.
- [7] 王智超, 郑军星, 旷杜敏, 等. 超固结土三轴率敏感性特性及影响因素分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2019, 16(1): 92-99.
- [8] 李新明, 孔令伟, 郭爱国, 等. 考虑超固结比和应力速率影响的膨胀土卸荷力学特性研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(增刊 2): 121-127.
- [9] 魏松, 张文进, 肖淑霞, 等. 超固结比影响下饱和黏土力学特性试验研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2017, 36(5): 64-70.
- [10] 张文进. 应力历史对饱和膨胀土强度特性影响的试验研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2016.
- [11] 邓祖保, 林宾. 合肥地区老粘性土的工程特性及抗浮设计[J]. 西部探矿工程, 2012(10): 3-5.

(责任编辑 张淑艳)

(上接第 467 页)

6 结 论

针对蚁群算法在机械臂路径规划中存在的问题, 如搜索路径过长、收敛速度慢等, 本文对蚁群算法作如下改进: 将蚁群分为外层蚁群和内层蚁群, 分别设计不同的启发函数, 并引入安全因子提高机械臂运动过程的安全性, 利用外层蚁群初始信息素, 引导内层蚁群进行全局寻优, 在更新信息素时引入狼群的猎物分配原则, 限制部分路径信息素浓度于合理范围内。改进的算法通过在 MATLAB 和 RobotStudio 中的仿真验证, 结果表明改进后的蚁群算法在收敛速度上, 路径代价相比基本蚁群算法和文献[12]算法具有明显的优势, 而且在机械臂仿真中表现良好, 可以快速地为机械臂规划一条最优路径。

[参 考 文 献]

- [1] 马慧丽. 六自由度机械臂的避障路径规划研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2020.
- [2] 张立. 工业机械臂的智能运动规划与避障方法研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2018.
- [3] 袁媛. 六自由度机械臂运动学及奇异性仿真分析[J]. 机电工程, 2018, 35(12): 1329-1333.
- [4] 刘畅. 车身焊接工业机器人的路径规划及仿真[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2017.
- [5] 李季, 史晨发, 邵磊, 等. 基于改进 RRT 算法的 6-DOF 机器人路径规划[J]. 计算机应用与软件, 2020, 37(9): 221-226.
- [6] LIU S, ZHANG Q, ZHOU D. Obstacle avoidance path planning of space manipulator based on improved artificial potential field method[J]. Journal of the Institution of Engineers(India): Series C, 2014, 95(1): 31-39.
- [7] 宗成星, 陆亮, 雷新宇, 等. 一种基于 A* 算法的空间多自由度机械臂路径规划方法[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2017, 40(2): 164-168.
- [8] 董航, 杜广胜, 刘冬, 等. 基于遗传算法的码垛机器人关节路径规划[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2017(5): 29-31, 35.
- [9] 马卫, 朱庆保. 求解函数优化问题的快速连续蚁群算法[J]. 电子学报, 2008, 36(11): 2120-2124.
- [10] 吕文壮, 曹家勇, 党铭章, 等. 改进蚁群算法在焊接机器人路径规划中的应用[J]. 机械设计与研究, 2019, 35(6): 32-36.
- [11] 伊华伟. 基于改进蚁群算法的机械手三维操作路径规划[J]. 计算机应用与软件, 2014, 31(4): 302-304, 307.
- [12] 赵华东, 雷超帆, 江南. 基于改进蚁群算法的六自由度机械臂路径规划[J]. 郑州大学学报(理学版), 2020, 52(1): 120-126.
- [13] 王刚, 张方, 严大亮, 等. 基于改进蚁群算法的机器人三维路径规划[J]. 国外电子测量技术, 2020, 39(11): 1-6.
- [14] 倪郁东, 费学芳, 沈吟东, 等. 基于改进狼群算法的移动机器人路径规划[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2019, 42(10): 1424-1430.

(责任编辑 张 镛)