

路堤高边坡桩锚与悬臂式挡墙联合支护特性分析与监测

刘 杰¹, 杨仕教^{1*}, 严谭路¹, 罗 辉²

(1. 南华大学 核资源工程学院, 湖南 衡阳 421001; 2. 长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410076)

摘 要: 目前在实际工程设计中组合结构应用越来越广泛, 但协调作用理论和受力特性尚未完善. 为了系统研究桩锚与悬臂式挡墙联合支护结构受力特性, 采用有限元方法与监测手段结合, 建立三种分析模型. 分析表明: 单独悬臂挡墙设计模型立面板弯矩稍低于联合设计模型, 变化幅度小且变化规律基本一致; 单独悬臂挡墙模型底板弯矩高于联合设计模型, 底板配筋量将远大于实际需要配筋量, 造成材料浪费; 与联合设计模型相比, 单独桩锚设计会使桩身变形计算偏于危险, 不利于桩锚支护结构安全, 锚杆锚固段轴向拉力大于联合设计模型锚杆轴向力; 与监测结果相比, 单独悬臂挡墙设计模型坡顶的水平位移偏高, 低估了坡顶沉降. 本研究所得结论和成果可为类似工程设计以及组合结构设计计算理论研究提供参考和借鉴.

关键词: 路堤高边坡; 组合结构; 联合支护; 数值模拟

中图分类号: U417.1

文献标志码: A

Analysis and Monitoring of Combined Support by Pile Anchor and Cantilever Retaining Wall in High Embankment Slope

LIU Jie¹, YANG Shi-jiao^{1*}, YAN Tan-lu¹, LUO Hui²

(1. School of Nuclear Resources Engineering, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China;

2. School of Transportation Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha, Hunan 410076, China)

Abstract: At present, the composite structure is being more and more widely used in practical engineering design, however, the theory of coordination function and the characteristic of force have not been perfect. In order to systematically study the mechanical characteristics of structure of pile anchor and hanging combined cantilever retaining wall, three analytical models were established by combining finite element method with monitoring method. Analysis show that the bending moment of the vertical panel of cantilever retaining wall mod-

收稿日期: 2017-12-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(50974076)

作者简介: 刘 杰(1992-), 男, 硕士研究生, 主要从事岩土灾害与控制、岩土勘察与设计等研究工作. E-mail: 15886429480@163.com. * 通讯作者: 杨仕教, E-mail: cute1088@sina.com.

el is slightly lower than that of the joint design model, the range of change is very small, and the variation law is basically consistent; the bending moment of the bottom plate of cantilever retaining wall is higher than that of the joint support design model, the floor reinforcement will be much larger than the actual required reinforcement, resulting in waste of materials; compared with the joint design model, the single pile anchor model will make the calculation of pile deformation more dangerous, which is harmful to the safety of pile anchor support structure; the axial tensile force of anchor section of single pile anchor design model is larger than that of joint support design model; compared with the monitoring results, the horizontal displacement of single cantilever retaining wall slope was relatively high, and underestimated ground surface settlements. The conclusions and results obtained from this paper can provide reference for similar projects design, and can also provide reference for the design and calculation theory of composite structures.

key words: High embankment slope; Composite structure; Composite support; Numerical simulation

0 引言

我国幅员辽阔、山区面积大,随着基础设施建设加快,高陡、环境复杂的边坡数量剧增,单一支护结构对特殊工程地质条件和特殊空间使用条件无法满足要求,因此寻求多种结构组合支护治理成为研究热点^[1-4]。其中桩锚结构与悬臂式挡墙组成一种新型组合支挡结构,它能很好地解决高陡边坡土体易失稳、施工过程安全性差和地基承载力不足等问题^[5]。尤其对于填方边坡,这种复合结构可减少桩长,从而优化桩身受力,同时可充分利用悬臂式挡土墙优点。它从结构形式可分为单排桩^[6-8]、双排桩^[9]、多排桩复合挡墙,从桩基类型可分为半刚性桩和刚性桩复合挡墙^[10],从桩基的布置形式可分为不均匀^[10]和均匀分布桩基复合挡墙^[6]。

实际工程设计时,通常将两种支护结构分开单独进行计算设计,与实际受力相差较大。设计计算方面,由于两种支护结构受力模型不同,其计算模型如何建立有待进一步完善,尤其是两种结构受力变形的协调及破坏模式有待进一步研究。可见,桩锚与悬臂式挡墙联合支护结构作为一种应用越来越普及的组合结构其设计理论滞后于工程实践。

马平等^[11-13]采用数值模拟研究了桩锚与土钉墙组合结构在工程设计上造成的差异,本文采用类似方法结合某工程案例利用有限元模拟对桩锚与悬臂式挡墙组合结构不同工况进行受力计算,并分析其特性,最后将模拟结果与现场监测进行对比。研究结果可为桩锚与挡土墙联合支护结构的工程设计提供经验和借鉴。

1 工程概况和模型分析

1.1 工程概况

某边坡为衡阳市某道路路堤填方高边坡,坡顶为拟建交通要道,车道宽8 m,坡高约16 m,填方高度约5 m,填土下覆强风化粉砂质泥岩。经方案研究,最后采用桩锚+悬臂式挡墙组合支护,其中设计桩长16 m,嵌固深度5 m,桩尺寸为1.5 m×1.2 m矩形桩,桩间距4 m,桩身共设置三道锚杆,第一道设置在桩顶以下0.5 m位置,第二道设置在桩顶以下3.5 m位置,第三道设置在桩顶以下6.5 m位置,桩间采用挂网砼锚喷支护;桩顶以上填土部分采用悬臂式挡土墙支护,墙高5 m,立板和底板厚均为0.5 m。

1.2 模型分析与简化

目前组合结构工程设计中悬臂式挡土墙设计部分先不考虑下部桩锚支护部分土体开挖的影响,把下部桩锚部分看做稳定的;结构设计过程中,将挡墙以上人群荷载、道路荷载与建筑物换算成相应荷载进行土压力计算,使挡墙设计满足抗滑、抗倾覆稳定性与整体稳定性要求。抗滑桩结构设计中将挡墙及其以上土体部分处理成荷载和一个等效集中力,再按照抗滑桩设计理论进行下部桩锚支护体系计算。

这种设计处理方法,尽管能分别满足局部稳定性要求,但是对其整体稳定性和组合结构受力情况无法确定,与实际受力有一定差异。故为系统研究桩锚与悬臂式挡墙组合结构,根据分开单独设计与联合支护设计的做法同边坡实际开挖支护思路结合,分别建立单独设计和联合设计模型,共3个模型。模

型 1 为桩锚与悬臂式挡墙联合支护模型,如图 1 所示;模型 2 为单独桩锚设计模型,如图 2 所示;模型 3 为单独悬臂式挡墙设计模型,如图 3 所示.通过分析对比不同设计方法坡顶位移、桩顶位移、墙身弯矩、锚杆拉力和桩身弯矩等反映组合支护结构的特性.

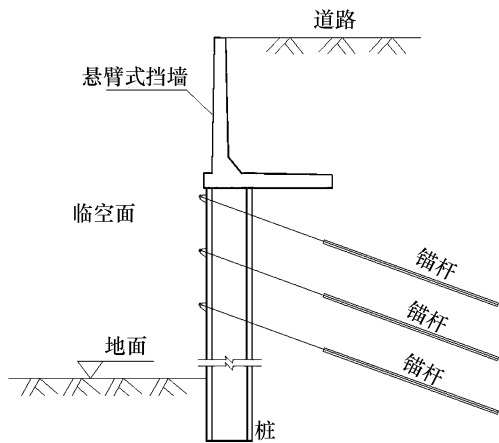


图 1 桩锚与悬臂挡墙联合支护设计模型
Fig.1 Combined support model of pile anchor and cantilever retaining wall

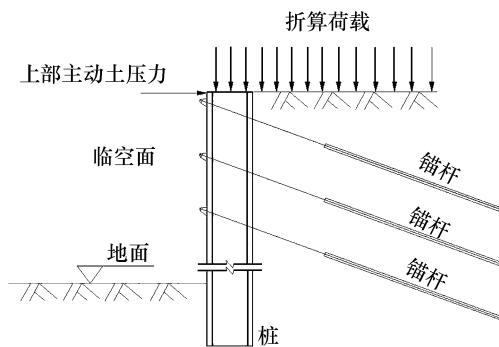


图 2 单独桩锚设计模型
Fig.2 Separate pile anchor model

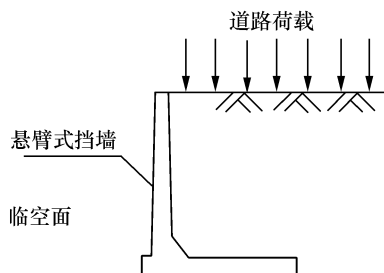


图 3 单独悬臂设计模型
Fig.3 Separate cantilever retaining wall model

2 模型建立和计算参数

利用有限元软件 MIDAS/GTS 对三种模型进

行分析,模拟中假定挡墙、桩、锚杆均为线弹性材料,模型中土体采用平面应力单元和摩尔—库仑本构模型.悬臂挡墙立面板和底板简化为宽 1 m 的梁,高度为结构厚度,桩也看作梁单元.土体采用 Mohr-Coulomb 强度准则,由于地下水埋藏深度大,计算不考虑地下水问题.

边坡分析模型计算范围一般按影响范围设定:竖向分析深度为 2~3 倍边坡开挖深度,水平分析宽度为边坡宽度外向两侧延伸 1~2 倍边坡开挖深度^[14],为了考虑计算效率、人工边界对计算结果的影响以及对比分析的需要,单独悬臂挡墙设计模型选取 10 m×25 m 的有限元模型区域,上部约 5 m 填土深度,下覆 5 m 强风化砂质泥岩,道路荷载取 25 kN/m.单独桩锚设计模型中悬臂挡墙和填土部分折算成荷载计算,因此路宽范围内总地面超载取 110 kN/m,桩顶其他区域地面超载取 90 kN/m.同时,将填土部分作用在墙身立面板上的主动土压力折算成集中力等效作用在单独桩锚设计模型的桩顶,取 75 kN 计算.模型选取 25 m×50 m 的有限元模型区域,区域内均为强风化砂质泥岩.桩锚与悬臂式挡墙联合支护模型选取 30 m×50 m 的有限元模型区域,上部约 5 m 填土深度,下覆 25 m 强风化砂质泥岩,道路荷载取 25 kN/m 计算.

进行这三种模型有限元分析时,采用相同的土层参数、桩参数、挡墙参数(见表 1)与锚杆参数如表 2 所示.

表 1 土层参数

Table 1 Soil parameters

材料	γ /(kN·m)	E /MPa	μ	C /kPa	Φ /(°)
杂填土	18	4	0.2	0	35
强风化岩	23	80	0.15	50	30
墙身底板	25	30	0.2	/	/
立面板	25	30	0.2	/	/
支护桩	25	2×10^5	0.2	/	/

表 2 锚杆参数

Table 2 Bolt parameter

名称	γ (g·cm ⁻³)	E /MPa	μ	D /m	L /m
第一道锚杆	7.85	2×10^8	0.3	0.15	15.5
第二道锚杆	7.85	2×10^8	0.3	0.15	13
第三道锚杆	7.85	2×10^8	0.3	0.15	12

3 作用机理和数值模拟结果

3.1 作用机理分析

该复合结构中悬臂式挡土墙除了本身变形以外,还产生下部抗滑桩变形,故复合结构的挡土墙实际位移更大,而土压力与变形息息相关,导致挡土墙实际受到的土压力会更小.设计抗滑桩部分时,除了考虑受土压力和滑坡推力作用,简化后还将受到桩顶挡土墙传递的水平力和弯矩.

模拟计算完成后,将三种设计模型坡顶水平位移、竖直位移、墙身弯矩、支护桩弯矩和锚杆轴力结果进行对比分析,并在坡顶设置监测点,利用实际监测数据来检验模拟效果的可靠性和准确性.

3.2 墙身立面弯矩值对比

图4所示的单独悬臂挡墙设计模型中立面板的弯矩值稍大于联合支护设计模型中立面板弯矩值,但两者的变化规律基本保持一致.

单独悬臂挡墙设计模型计算结果中立面板弯矩稍高于联合支护设计模型,可能是联合支护设计模型中支挡结构位移大于单独悬臂挡墙设计模型计算的位移,从而导致联合支挡结构背侧主动土压力略低,故联合支护设计模型计算更为合理.

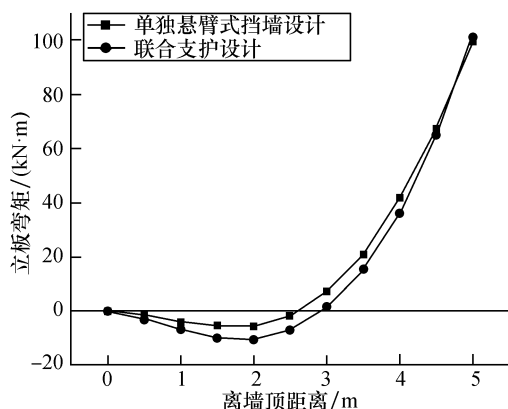


图4 悬臂挡墙立面弯矩图

Fig.4 Vertical panel bending moment diagram

3.3 墙身底板弯矩值对比

图5所示的底板弯矩图表明:在离立面板底端4 m范围内,单独悬臂挡墙设计模型和联合支护设计模型弯矩值均很小,几乎为零;在靠近底板端部位置,两者的弯矩值均快速增大,且前者增幅更大,其中单独悬臂式挡墙设计模型底板最大弯矩值为99.24 kN·m,联合支护模型最大弯矩值为12.77 kN·m,进行单独设计时比联合设计底板所承

受的弯矩更大.故在工程设计上采用单独悬臂挡墙设计方法会使底板配筋量远大于实际需求配筋量.

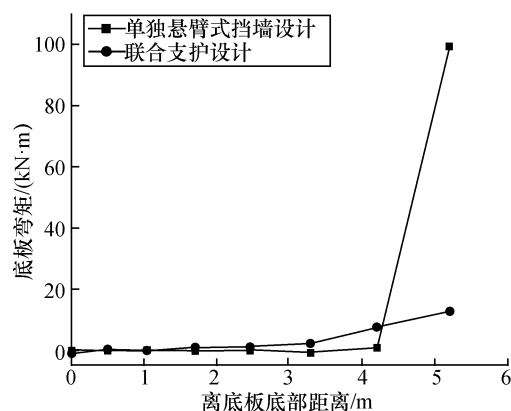


图5 底板弯矩图

Fig.5 Floor bending moment diagram

3.4 支护桩弯矩值对比

图6所示的单独桩锚设计模型与联合支护设计模型桩身弯矩值变化规律大致相同,两者均在抗滑桩桩身中部附近位置出现最大负弯矩值,值分别为-409.61 kN·m和-311.44 kN·m,最大正弯矩均出现在桩顶以下6.5 m位置.单独桩锚设计模型在桩顶位置弯矩接近于零,联合支护设计模型弯矩值为351.55 kN·m,说明单独设计模型容易过小估计桩顶弯矩,会导致桩顶变形偏于危险,故单独设计偏于保守.图中显示单独设计模型出现了5个弯矩零点,联合设计模型出现了4个弯矩零点,其中两个弯矩零点均出现在桩身第一道、第二道锚杆附近和桩端底部,说明锚杆对桩身起到了一定锚拉和控制变形的作用.在抗滑桩5 m长嵌固段部分弯矩值很小且逐渐减小为零,这表明支护桩嵌固段发挥了支承固定的作用.

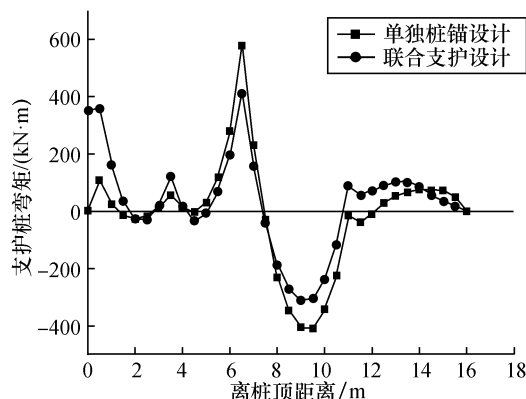


图6 支护桩弯矩图

Fig.6 Floor bending moment diagram

3.5 锚杆轴力对比

分析图 7、8、9 可知,单独桩锚设计模型比联合支护设计模型第一道锚杆初始轴力值要稍小,但两者的变化规律基本一致,在离锚头 6.5 m 位置附近随着深度的增加锚杆轴力逐渐减小,最终轴力值也基本相近;同样地,第二道锚杆初始应力值前者大于后者,其中联合支护设计模型锚杆最终轴力降低为初始值的 10%,而单独桩锚设计模型增大为初始轴力的 150%,显然单独设计方法高估了最终轴力;第三道锚杆所受初始应力值最大,分别为 $652.31 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 、 $492.82 \text{ kN} \cdot \text{m}$,且第三道锚杆所处位置位于支护桩中部附近,说明一般情况下,第三道锚杆初始轴力值最大的原因在于它所处位置在桩锚支护部分土体的中间,即使对锚杆施加预应力,桩锚支护受力最大位置也位于中部附近。

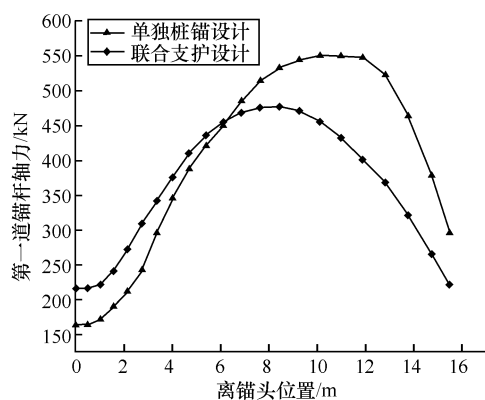


图 7 第一道锚杆轴力图

Fig.7 The first anchor axis force diagram

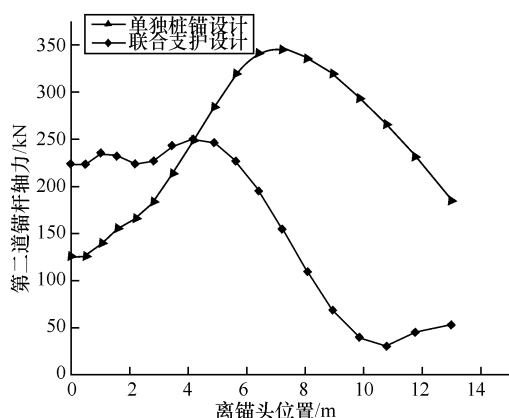


图 8 第二道锚杆轴力图

Fig.8 The second anchor axis force diagram

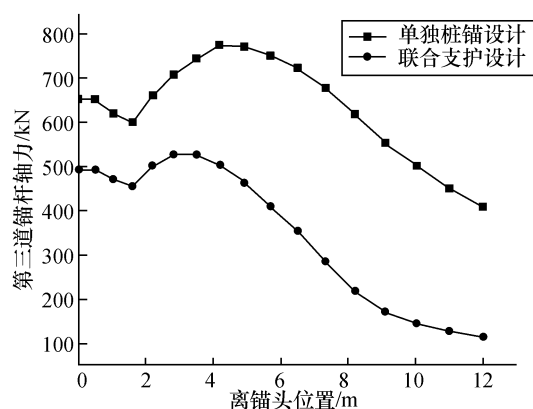


图 9 第三道锚杆轴力图

Fig.9 The third anchor axis force diagram

3.6 坡顶和桩顶位移、沉降对比与监测

分析数值模拟得到的位移可知,单独悬臂式挡墙设计模型中坡顶处最大水平位移值为 18.2 mm ,最大沉降值为 6.2 mm ;而单独桩锚设计模型在桩顶处的最大位移为 15 mm ,最大沉降值为 5.83 mm ;而联合设计模型最大位移位于坡顶为 15.18 mm ,拟建道路区域内坡顶最大沉降值为 5.4 mm 。

为了检验模拟效果的可靠性,在坡顶设置 2 个主要监测点,自施工起至竣工完成共 18 个月时间内监测结果如图 10 和图 11 所示,坡顶位移变形较小,其中最大水平位移值为 13.7 mm ,最大沉降值为 8.3 mm ,显然,联合支护设计模型位移变化更符合实际监测.根据相关边坡监测规范,坡顶的位移量均符合安全要求。

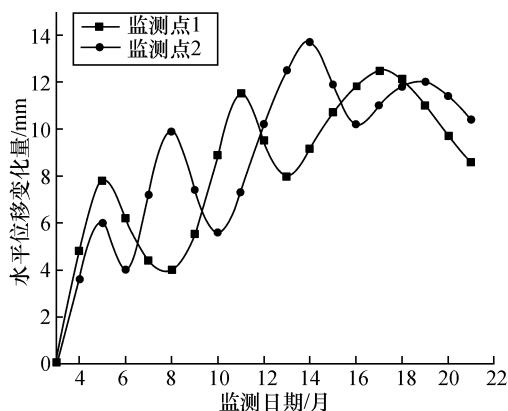


图 10 边坡水平位移变化与时间关系

Fig.10 Relationship between horizontal displacement of slope and time

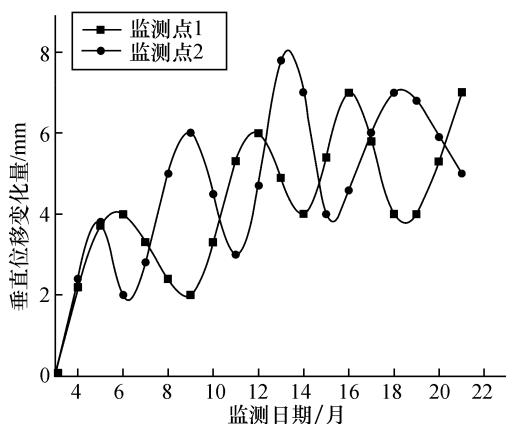


图11 边坡垂直位移变化与时间关系

Fig.11 Relationship between vertical displacement of slope and time

4 结 论

1) 工程上桩锚悬臂式挡墙组合结构分开单独设计方法得到的墙身立板弯矩大小和变化规律基本保持一致,而底板弯矩计算偏保守,导致底板配筋量将远大于实际需要配筋量,造成材料的浪费。

2) 与联合支护设计模型比较,单独桩锚设计会使桩身位移和变形计算偏于危险,不利于桩锚支护结构的安全。同时,高估了锚杆锚固段轴力,使得锚杆设计偏于保守。

3) 以现场监测结果为参考,单独悬臂式挡墙设计坡顶的水平位移偏高,而低估了坡顶沉降。

4) 联合支护设计模型同时考虑了上部悬臂式挡墙和下部桩锚结构,模拟过程中考虑了两种支护结构的协同作用,且真实反映了在该路堤边坡开挖支护填方过程中的空间时空效应,分析结果基本接近实际情况,结论可为类似工程设计提供参考。

参考文献:

- [1] 赵晓彦,吴兵,李登峰,等.考虑桩间水平土拱效应的边坡桩间墙组合结构受力计算方法[J].岩土工程学报,2016,38(5):811-817.
- [2] 封志军,赖紫辉,薛元.考虑桩-梁协调作用的桩基托梁计算理论分析[J].铁道工程学报,2012,29(6):33-36.
- [3] 陈荣,杨仕教,李锐.高填土边坡中双排桩扶壁式挡墙设计方法研究[J].南华大学学报(自然科学版),2016,30(2):117-122.
- [4] 谭韬,李明,朱平,等.一种复杂工况下的桩锚扶壁式复合挡墙的设计及数值分析[J].南华大学学报(自然科学版),2017,31(2):102-106.
- [5] ZHANG Q. Analysis and study on slope stability of high fill subgrade [J]. Advanced materials research, 2014, 3149(919):637-640.
- [6] 张可能,符滨,廖来兴,等.桩承扶壁式挡墙受力特性及监测分析[J].中外公路,2014,34(2):37-40.
- [7] 王抒扬.桩基挡墙在高速铁路陡坡路基中的应用[J].铁道勘察,2015,41(3):57-59.
- [8] 王俊杰,赵迪,杨恒.单排桩基-承台-挡墙组合支护结构设计计算方法[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2017,36(4):63-68.
- [9] 高立,李洪岗,聂文峰,等.新型桩墙组合结构在高陡边坡支护中的应用研究[J].路基工程,2017(3):184-187.
- [10] 李洪亮,魏洪涛,沈可,等.采用桩基础的悬臂式挡墙计算分析[J].公路,2009(11):111-115.
- [11] 马平,申平,秦四清,等.深基坑桩锚与土钉墙联合支护的数值模拟[J].工程地质学报,2008,16(3):401-407.
- [12] 泮晓华,薛雷,涂杰楠,等.深基坑疏排桩锚与土钉墙水平联合支护数值模拟[J].工程勘察,2010,38(11):1-5.
- [13] LIU W T, TSAI H Y, TU M H. Numerical analysis of the ground anchor and row piles in mudstone dip slope [J]. Applied Mechanics & Materials, 2012, 1975(204):703-707.
- [14] 中华人民共和国国家标准编写组.建筑边坡工程技术规范:GB 50330—2013[S].北京:中国建筑工业出版社,2013.

(上接第5页)

- [11] 蔡林翔,于航,赵美,等.调湿型建筑材料对室内温湿度调节效果实验研究[J].建筑科学,2016,32(2):54-60.
- [12] 杨骏.多孔调湿材料对室内热湿环境的影响[D].南京:南京大学,2015.
- [13] 张浩,黄新杰,刘秀玉,等.优化制备棕榈醇-棕榈酸-月桂酸/SiO₂复合相变调湿材料[J].材料研究学报,2015,29(9):671-678.

- [14] 张言武,陈剑波,梁煦,等.调湿材料对室内湿环境影响的实验研究[J].建筑节能,2016(2):48-51.
- [15] International standards organization. Ergonomics of the thermal environment-Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria:ISO7730:2005[S]. London: International Standards Organization, 2005:14-17.