

# 抗滑桩截面形状优化选择

汪儒鸿<sup>1,2</sup>, 周海清<sup>1,2</sup>, 吴润泽<sup>1</sup>, 梁华友<sup>1</sup>

(1. 后勤工程学院 军事土木工程系, 重庆 401331;  
2. 岩土力学与地质环境保护重庆市重点实验室, 重庆 401331)

**摘要:**利用 FLAC3D 软件,对矩形和圆形截面抗滑桩的支挡效果进行了定性分析,通过变量控制并结合土拱效应的相关理论,得出了在抗滑桩刚度相同或者横截面面积相等(经济成本和截面承载力相等)的前提下,在不同土质的砂土中,矩形截面抗滑桩较圆形截面抗滑桩所形成的桩后土拱更稳定,对滑体支挡效果更好,对抗滑桩截面形状的选择与设计有较大的参考价值。

**关键词:**抗滑桩截面形式;定性分析;数值模拟;矩形;圆形

**本文引用格式:**汪儒鸿,周海清,吴润泽,等.抗滑桩截面形状优化选择[J].兵器装备工程学报,2017(8):178-182.

**Citation format:**WANG Ruhong,ZHOU Haiqing,WU Runze,et al. Selection Optimization of Section Shape of Anti-Slip Pile [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering,2017(8):178-182.

中图分类号:TU411

文献标识码:A

文章编号:2096-2304(2017)08-0178-05

## Selection Optimization of Section Shape of Anti-Slip Pile

WANG Ruhong<sup>1,2</sup>, ZHOU Haiqing<sup>1,2</sup>, WU Runze<sup>1</sup>, LIANG Huayou<sup>1</sup>

(1. Department of Architectural Engineering, Logistical Engineering University of PLA, Chongqing 401331, China;  
2. Key Laboratory of Geomechanics and Geological Environment Protection of Chongqing Municipality, Chongqing 401331, China)

**Abstract:** This paper uses FLAC3D software, and it has rectangular and circular piles of section analysis and qualitative analysis respectively, and it has better effect on retaining wall through variable control and combining with the theory of soil arching effect, and it is concluded that for the same or equal cross section area in the pile stiffness (economic costs and equal cross section bearing capacity) under the premise of sandy soil in different soil, there are rectangular section of anti-slide piles formed by a circular cross section pile been arch is more stable, and the better effect of the retaining wall of the sliding body, and the selection of the pile cross section shape and design have great guidance reference value.

**Key words:** section forms of anti-slide piles; qualitative analysis; numerical modeling; rectangle; circular

在山区公路及铁路修建中,由于地质地形条件复杂,形成大量高边坡工程,抗滑桩的应用越来越多。为了降低工程造价,在条件许可的情况下,抗滑桩常采用非连续结构,不设置挡土板,利用土体自身强度形成的拱效应<sup>[1]</sup>将桩间土体的下滑推力传递到桩身,达到支挡的目的。杨明等<sup>[2]</sup>从抗滑桩

的宽度和桩间距对土拱效应的影响进行了研究;文兴等<sup>[3]</sup>对特殊截面抗滑桩的受力特征与土拱效应进行了分析;任永忠等<sup>[4]</sup>对不同拱脚形式下的抗滑桩的土拱效应进行了研究。但从文献资料来看,从截面形状出发的对抗滑桩支挡效果影响的研究几乎没有。在滑坡治理工程中,设计人员对抗滑桩

收稿日期:2017-02-23;修回日期:2017-03-30

基金项目:国家自然科学基金项目(41072243;41272356)

作者简介:汪儒鸿(1994—),男,硕士研究生,主要从事防灾减灾与防护工程研究。

通讯作者:周海清(1971—),男,博士,教授,主要从事边坡稳定性及防灾减灾研究。

截面形状的选择往往多依靠经验,无足够理论支撑。本文采用数值模拟方法,结合实际工程中出现最多,也是最常见的矩形抗滑桩与圆形抗滑桩,对这两种不同截面形状的抗滑桩支挡的效果进行了研究分析,得出了有关截面形状优化选择的结论。

在滑坡治理过程中,圆形抗滑桩和矩形抗滑桩是最常见的两类抗滑桩。其中矩形抗滑桩主要采用人工挖孔,具有造价低廉,抗滑桩刚度较高的优点,不足之处在于人工施工时安全隐患较大;圆形抗滑桩主要采用机器钻孔或冲孔,优点在于施工方便,安全性较高,施工工期较短,不足之处在于造价较高。

## 1 计算模型及模型参数

通过数值模拟来研究抗滑桩支挡效果的方法已经被越来越多的学者所采用<sup>[5-9]</sup>。本次数值模拟的核心在于改变抗滑桩的截面形状,分析其对抗滑桩支挡效果的影响。

数值模拟共搭建3种不同的模型,称为矩形模型,同刚度圆桩模型和同面积圆桩模型。每种模型均由滑体,滑面,基岩,抗滑桩四部分组成,其中3种模型的滑体、滑面、基岩部分基本相同,特别是同体积同高度滑体。主要区别在于抗滑桩部分,具体设置及材料参数如下:

### 1.1 滑体材料参数

滑体为内摩擦角分别为 $15^{\circ}$ , $25^{\circ}$ , $35^{\circ}$ 的砂土,如表1所示。通过平行验证确保在不同土质的砂土中,圆形和矩形抗滑桩在支挡效果上具有同一性。虽然只考虑了砂土,但对在黏聚力较大的土体中设计抗滑桩也具有参考意义。

表1 砂土内摩擦角( $\Phi$ )参考值

名称	粉砂土	细砂土	中砂土	粗砂土
内摩擦角/ $(^{\circ})$	15~25	20~30	25~30	30~40

### 1.2 抗滑桩间距

相关研究指出:抗滑桩桩间净距过大,土拱效应无法发挥作用;桩间净距过小,土拱效应的作用被浪费<sup>[10-13]</sup>。本次数值模拟结合实际施工中将抗滑桩桩间净距取为2~3倍桩宽的常见做法,将所有模型的抗滑桩桩间净距均取为5 m。

### 1.3 抗滑桩

矩形模型与同面积圆桩模型用来验证相同横截面面积(经济成本相同及截面承载力相同)的不同截面形状抗滑桩支挡效果的区别;矩形模型与同刚度圆桩模型用来验证相同刚度的不同截面形状抗滑桩支挡效果的区别。抗滑桩截面参数见表2,布置形式如图1、图2所示。

## 2 模拟步骤

三类模型建立后,通过改变滑体内摩擦角的大小和对模型加载不同的荷载因子 $a$ ( $a$ 与重力系数成比例,例如 $a=3$

表示对模型加载0.3倍重力),研究不同土质条件及不同的重力系数时抗滑桩支挡效果的区别。主要对生成的两种结果进行研究分析:第1种是模型在计算运行足够时步之后,生成的最大不平衡力监测图,以此判定该模型能否稳定收敛及抗滑桩的支挡是否有效;第2种是模型计算足够时步之后生成的滑体位移云图,并提取关键部位的滑体位移值,用以生成荷载-位移曲线。

表2 抗滑桩截面尺寸

抗滑桩截面形状及相关参数	矩形桩	同面积圆桩	同刚度圆桩
宽度(m)/直径	2	2.76	3.1
长度(m)/直径	3	2.76	3.1
高度(m)	2	2	2
抗滑桩刚度	4.5	2.85	4.53
抗滑桩横截面积/ $m^2$	6	5.99	7.55

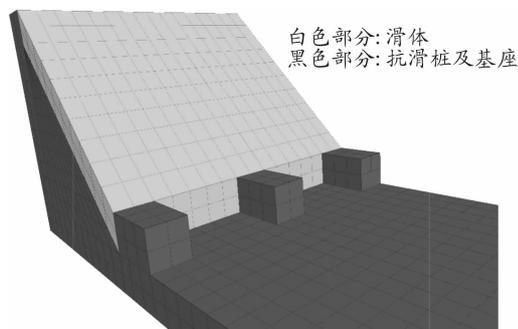


图1 矩形桩模型示意图

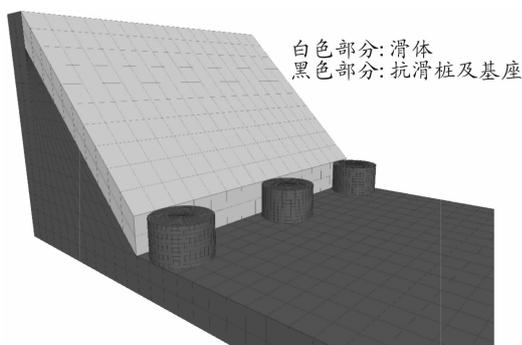


图2 圆形桩模型示意图

## 3 结果分析

### 3.1 最大不平衡力监测图的分析

通过对最大不平衡力的监测,可以判断桩后滑体是否受到有效支挡,对3种模型抗滑桩的支挡效果加以对比。如表3组别示意1所示,在不同条件下一共进行了6组模拟。

以第2组的结果为例:图3(a)、(b)、(c)分别表示矩形桩,同刚度圆形桩,同面积圆形桩在滑体内摩擦角等于 $15^\circ$ ,重力荷载因子 $a=3$ 时,模型计算到足够步数之后生成的最大不平衡力监测图。可以看出:矩形桩表现出了明显的收敛性,最大不平衡力逐渐减小直至稳定。这是因为在土体下滑过程中,土体不断挤压发生压缩和变形,产生不均匀沉降,致使土颗粒间产生互相“楔紧”的作用,于是在一定范围土层中产生“拱效应”<sup>[14]</sup>,使最大不平衡力逐渐变小。而图3(b)、(c)表示的两类圆形抗滑桩,虽然一开始最大不平衡力也逐渐减小,但最终失稳增大,说明土体刚开始产生了一定拱效应,但最终由于桩间土拱发生破坏,支挡失效,导致滑体出现大变形大位移。图3(d)、(e)表示两类圆形抗滑桩在土体内

摩擦角同样为 $15^\circ$ ,但重力荷载因子 $a=1$ 时的支挡情况,用于与图3(b)、(c)组对照。可以观察到,此时同刚度圆桩和同面积圆桩的图形都是收敛的,说明随着重力因子的加大,圆形抗滑桩从支挡有效变为支挡失效,而矩形抗滑桩依然能保持良好的支挡效果,说明此类条件下矩形抗滑桩优于圆形抗滑桩。

表3 组别示意1

模拟组别	1	2	3	4	5	6
滑体内摩擦角/ $(^\circ)$	15		25		35	
荷载因子 $a$	1	3	2	5	3	8

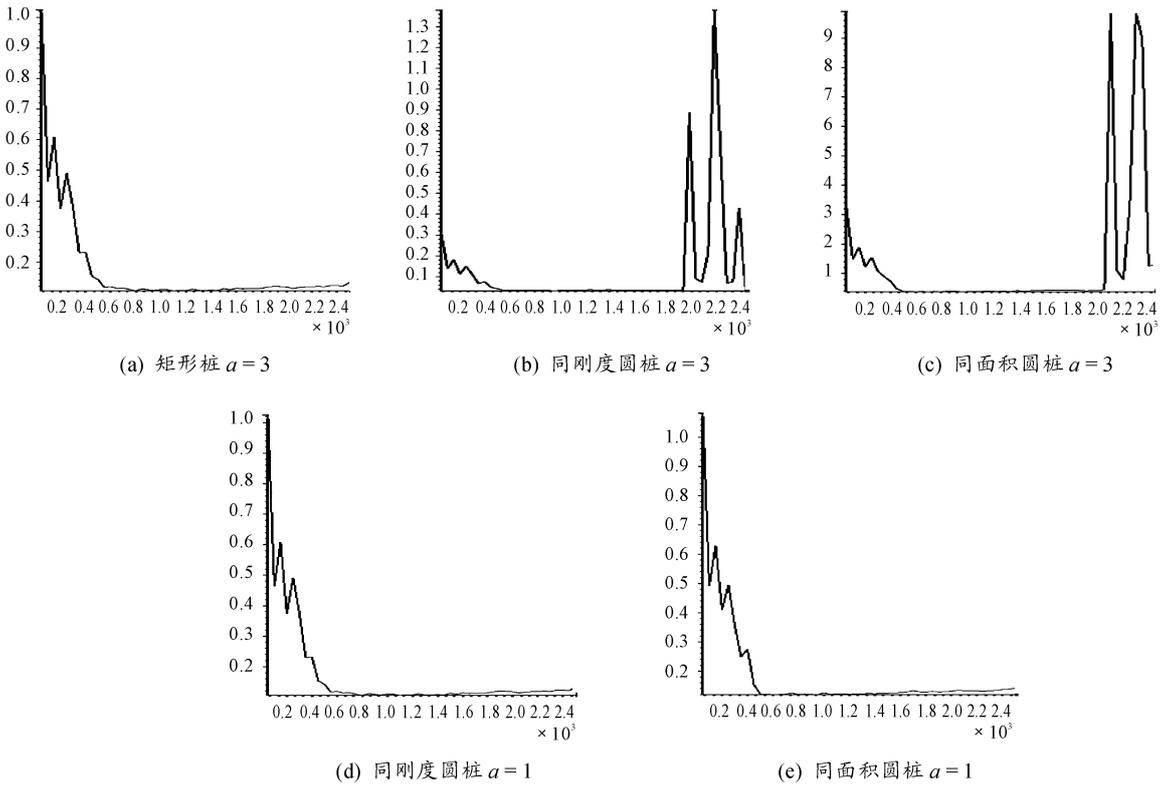


图3 最大不平衡力监测图

对其他5组生成的结果也进行如上分析,总的结果整理后如表4所示。表4中:“稳定”说明通过对模型最大不平衡力的监测,模型的最大不平衡力逐渐减小,最终收敛,抗滑桩的支挡效果较好;“不稳定”说明通过对最大不平衡力的监测,模型最大不平衡力无法收敛,抗滑桩支挡失效,滑体最终处在不稳定、位移较大的状态。

3.2 滑体位移-荷载曲线分析

除监测最大不平衡力以外,对不同条件下滑体位移情况进行分析对比,也是评价两类不同截面形式抗滑桩支挡效果的重要方法。如表5组别示意2所示,在土体内摩擦角分别为 $15^\circ$ 和 $25^\circ$ 的砂土中分别对3种模型加载不同的重力条件,观察其支挡效果。

表4 不同土质及荷载条件下结果汇总

模拟组别	1	2	3	4	5	6
土体内摩擦角/ $(^\circ)$	15		25		35	
荷载因子	1	3	2	5	3	8
矩形桩	稳定	稳定	稳定	稳定	稳定	稳定
同刚度圆桩	稳定	不稳定	稳定	不稳定	稳定	不稳定
同面积圆桩	稳定	不稳定	稳定	不稳定	稳定	不稳定

表5 组别示意2

模拟组别	土体内摩擦角/(°)	荷载因子 $a(a=0.1$ 倍重力系数)				
第1组	15	1	2	3	4	5
第2组	25	1	3	5	7	9

图4为某一组条件下的两幅滑体位移云图:可以看出矩形抗滑桩和圆形抗滑桩的桩后均有明显的土拱效应,说明都起到了一定的支挡作用,但相位移的滑体分布位置及范围有明显区别,因为两种截面形状的抗滑桩的支挡效果不一样。为了更直观表现3类模型的抗滑桩支挡效果的区别,将图4中a、b两点作为观测点,分别提取a、b两处的位移数据生成荷载-位移曲线。其中a点表示桩后滑体位移最大部分的位移值,反映桩间滑体的挤出情况;b点表示占桩后滑体体积最大部分的平均位移值,表现整个滑体的下滑状况,该值也最能反映抗滑桩的整体支挡效果。两组数据生成的位移-荷载曲线分别如图5、图6所示:横坐标 $X$ =荷载因子,纵坐标 $Y$ =观测点位移值/荷载因子。因为滑体位移随荷载因子加大而变化的幅度过大,3类抗滑桩滑体观测点位移值的差值与之相比较小,所以纵坐标这样设置有利于使不同截面形状抗滑桩支挡效果的区别更加明显,便于观察比较。

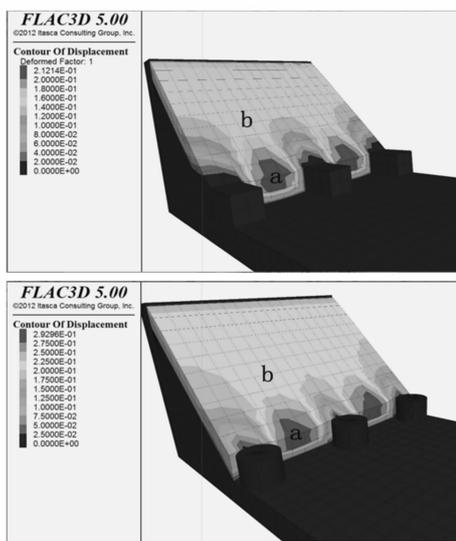


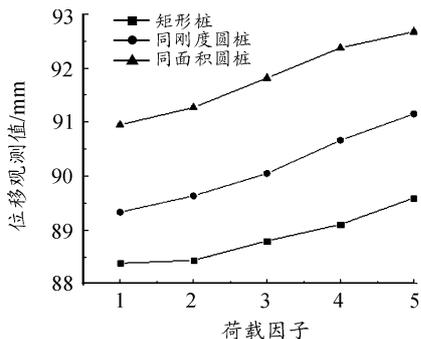
图4 位移云图示意图

从两组位移-荷载曲线可以看出:在不同土质的砂土中,相同重力条件下矩形抗滑桩桩后滑体位移要小于另外两组圆形抗滑桩,具体体现在以下方面:

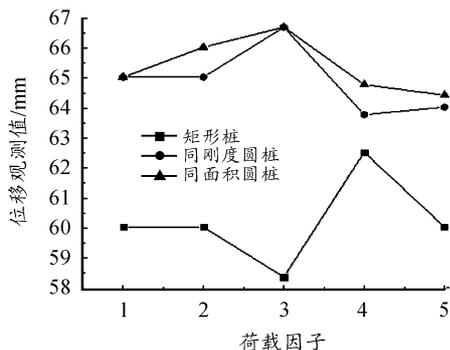
1) 矩形抗滑桩桩间土体的最大位移要小于与其同刚度及同截面面积的圆形桩,如图5(a)和图6(a)所示。一般来说,桩间土体最大位移越小,滑体发生绕桩挤出的可能性越小,如果桩间设置桩板墙,则桩板墙后的压力也会较小。

2) 矩形抗滑桩对桩后滑体的整体支挡效果好于另外两组圆形抗滑桩。主要体现在占矩形桩桩后滑体最大体积比例部分的平均位移要小于另外两类抗滑桩,如图5(b)和图6

(b)所示。说明此时矩形抗滑桩的土拱效应得到了有效发挥,对拱上方土体支挡的效果更好。

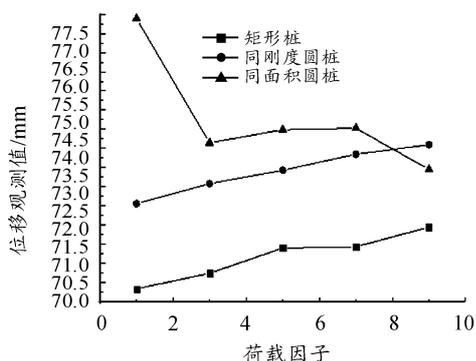


(a) a点位移

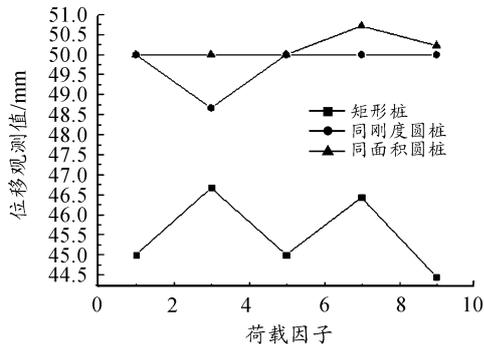


(b) b点位移

图5 第1组位移-荷载曲线



(a) a点位移



(b) b点位移

图6 第2组位移-荷载曲线

3) 对比两组圆形抗滑桩 b 点的位移 - 荷载曲线可以发现,虽然同刚度圆桩的半径要大于同面积圆桩,但两者滑体整体的位移区别不大,说明圆形抗滑桩半径的增大对滑体整体支挡效果的加强并不明显。

## 4 同类型研究对比

本文是建立在数据模拟基础上的分析,为使得相关数据及结论更加准确可信,特与其他同类型研究的结果进行分析对比:

1) 马年祖<sup>[15]</sup>就针对 T 形、正方形、矩形、正五边形、正六边形、圆形这六种不同形式抗滑桩采用弹塑性有限元强度折减法,按照 1.35 和 1.50 两类内力变化,对其加固效果进行对比分析,并研究抗滑桩一边坡体系的整体抗倾覆性与桩间土拱效应,其结果如表 6 所示。从工程安全方面来说,T 形加固后期效果好。然而由于要照顾到施工复杂等因素的影响,当方向已知时安全性较好的是方形与矩形;方向未知时,圆形加固效果优于矩形。

表 6 不收敛 6 种截面桩加固边坡的安全系数

截面形状	数值	截面形状	数值
T 形	1.921	正五边形	1.574
正方形	1.812	正六边形	1.535
矩形	1.713	圆形	1.482

2) 年延凯<sup>[16]</sup>也认为:在实际工程中,在滑动方向已知条件下,矩形和方形抗滑桩优于圆形截面桩。

由于本文研究的是在滑动方向已知时不同截面形状抗滑桩的支挡效果,所以在数值模拟中得到矩形抗滑桩综合支挡效果优于同刚度或者同截面面积圆形抗滑桩的结果,与同类型研究的结论是契合的。

## 5 结论

1) 在抗滑桩刚度相同或者横截面面积相等(经济成本和截面承载力相等)的前提下,矩形抗滑桩在不同土质的砂土中均表现出比圆形抗滑桩更好的支挡效果。主要体现在矩形抗滑桩对桩后滑体的整体支挡效果较好,其桩后滑体的平均位移较小;同时矩形抗滑桩桩间土体的最大位移也要小于与其同刚度或同面积的圆形抗滑桩,这对桩板墙的设计以及滑体绕桩挤出的确定有重要意义。

2) 圆形抗滑桩截面半径的增大对加强滑体的支挡效果并不显著,在一定条件下,换用矩形抗滑桩治理边坡比单纯增大圆形抗滑桩截面半径更有意义。

3) 在不同截面形状的抗滑桩造价成本相等或截面承载力相近的情况下,矩形截面抗滑桩对滑体的支挡效果更好,综合效益更高,在抗滑桩截面形状的选择中应多加以考虑。

## 参考文献:

- [1] 肖淑君,陈昌富. 基于统一强度理论抗滑桩桩间距的计算[J]. 工程地质学报,2011,19(1):199-204.
- [2] 杨明,姚令侃,王广军. 桩间土拱效应离心模型试验及数值模拟研究[J]. 岩土力学,2008(3):817-822.
- [3] 文兴,裴向军,刘云鹏. 特殊截面抗滑桩受力特征与土拱效应分析[J]. 工程地质学报,2013(5):797-803.
- [4] 任永忠,马守才. 基于不同拱脚形式下抗滑桩土拱效应研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版),2016(1):101-106.
- [5] 张建华,谢强. 抗滑桩结构的土拱效应及其数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报,2004,23(4):699-703.
- [6] 韩爱民,肖军华,梅国雄. 被动桩中土拱形成机理的平面有限元分析[J]. 南京工业大学学报,2005,27(3):89-92.
- [7] 李忠诚,杨敏. 被动受荷桩成拱效应及三维数值分析[J]. 土木工程学报,2006,39(3):114-117.
- [8] 琚晓冬,冯文娟,朱金明. 桩后土拱作用范围研究[J]. 三峡大学学报(自然科学版),2006,28(3):197-200.
- [9] 韩爱民,肖军华,梅国雄. 被动桩中土拱效应特征与影响参数研究[J]. 工程地质学报,2006,14(1):111-116.
- [10] 赵明华,陈炳初,刘建华. 考虑土拱效应的抗滑桩合理桩间距分析[J]. 中南公路工程,2006(2):1-3,28.
- [11] 赵明华,廖彬彬,刘思思. 基于拱效应的边坡抗滑桩桩间距计算[J]. 岩土力学,2010(4):1211-1216.
- [12] 郭院成,郭呈祥,叶永峰. 基于水平土拱效应的排桩支护结构合理桩间距的研究[J]. 四川建筑科学研究,2008(4):136-139.
- [13] 张建勋,陈福全,简洪钰. 被动桩中土拱效应问题的数值分析[J]. 岩土力学,2004,25(2):174-178.
- [14] 周应华,周德培,冯君. 推力桩桩间土拱几何力学特性及桩间距的确定[J]. 岩土力学,2006,27(3):455-462.
- [15] 马年祖. 不同抗滑桩截面对边坡加固效果的模拟分析[J]. 山东交通科技,2016(3):96-98,112.
- [16] 年延凯. 桩-土-边坡相互作用数值分析及抗滑桩设计计算方法[M]. 北京:中国建材工业出版社,2014.