

文章编号:1006-2467(2013)09-1372-05+1389

松散体滑坡抗滑桩加固的土拱效应分析

詹永祥¹, 姚海林¹, 董启朋¹, 王家强², 贺东平³

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071;

2. 江苏交通科学研究院股份有限公司, 南京 210017;

3. 中国水电顾问集团昆明勘测设计研究院 勘察分院, 昆明 650041)

摘要: 基于颗粒流理论, 采用 PFC^{2D} 程序对抗滑桩加固的松散体滑坡成桩后的土拱形成、发展及破坏过程进行研究, 分析细观因素(摩擦系数和孔隙率)对抗滑桩土拱效应的影响。结果表明: 抗滑桩第 1 次产生的土拱效应承担极限承载力; 土拱破坏后, 后续产生的土拱效应承担残余承载力, 残余承载力虽有波动但变化不大; 桩间土拱的极限承载力、残余承载力和桩体最大荷载分担比随着抗滑桩的桩间净距离增大而减小, 随着桩宽增加而增大, 但其变化关系并非简单的线性关系; 在一定范围内, 摩擦系数对抗滑桩土拱效应的影响较大, 土体摩擦系数越大, 土拱效应越明显, 土拱极限承载力越大, 且桩体最大荷载分担比呈增长趋势; 颗粒集合体的孔隙率对抗滑桩成拱的影响显著, 密实度低的松散体的土拱极限承载力相当于密实度高的松散体的残余承载力。

关键词: 松散体滑坡; 抗滑桩; 土拱效应; 颗粒流; 细观**中图分类号:** TU 473.1 **文献标志码:** A

Soil Arching Effect Analysis of Anti-slide Piles in Loose Media Landslide

ZHAN Yong-xiang¹, YAO Hai-lin¹, DONG Qi-peng¹, WANG Jia-qiang², HE Dong-ping³

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering,

Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China;

2. Jiangsu Transportation Research Institute Co. Ltd., Nanjing 210017, China;

3. Survey Branch of Kunming Survey and Design Institute,

China Hydropower Engineering Consulting Group, Kunming 650041, China)

Abstract: Based on particle flow theory, the process of formation, development, destruction and re-formation of the soil arching in loose media landslide were systematically studied by using PFC^{2D} program to analyze the effect of meso-mechanical parameters such as friction coefficient and porosity on pile-soil interaction characteristics. The results show that the soil arching produced by the anti-slide pile for the first time bears the ultimate bearing capacity; after the destruction of the soil arching, subsequent formation of the soil arching effect bears the residual capacity; the value of residual capacity fluctuates, but within a certain limit; the ultimate bearing capacity, the residual capacity and the maximum pile load distribution ratio decrease with the increase of pile clear spacing, and increase with the increase of pile width, yet the relation is not a linear one; the soil arching effect is greatly affected by the friction coefficient within a certain limit, and as the friction coefficient increases, the effect is more significant, the ultimate bearing capacity of soil

收稿日期: 2012-12-05**基金项目:** 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2013CB036405), 交通运输部建设科技项目(2011318775680), 中国科学院重点部署项目(KZZD-EW-05)资助**作者简介:** 詹永祥(1979-), 男, 安徽省淮南市人, 博士, 助理研究员, 主要从事路基工程研究。E-mail: zhanyongxiang@126.com.

arching is larger, and the maximum pile load distribution ratio tends to increase; soil arching effect is significantly affected by the porosity of particle aggregate, and the soil arch ultimate bearing capacity of low density loose landslide is equivalent to the residual capacity of high density loose landslide.

Key words: loose media landslide; anti-slide pile; soil arching effect; particle flow; meso-scale

目前,在斜坡治理中,将抗滑桩作为一种支挡结构的应用越来越多.抗滑桩成桩后的土拱效应是滑坡加固工程中的力学现象,对了解桩后土体的应力传递规律、分析桩土相互作用机理、优化桩的布设方案具有重要意义.

1943年, Terzaghi^[1]通过著名的活动门试验验证了土力学领域中土拱效应的存在.之后, Ladanyi等^[2]借助于数值模拟和理论研究的方法对活动门试验的结果进行了广泛深入的研究.近年来,国内学者对抗滑桩的土拱效应进行了大量理论计算和模拟试验研究^[3-11],但其中的理论研究大多建立在连续、均匀介质的基础上,研究结果难以准确描述抗滑桩土拱效应的形成机理和变化过程,并导致该类滑坡的抗滑桩工程设计的盲目性.由于滑坡体材料的非均匀性和非连续性,进行大型室内、外的土工试验和模型试验的费用较高且试验数据采集的难度较大,除了可以进行少数验证性试验外,难以进行大量的规律性试验.

鉴于此,本文借助于颗粒流理论,探讨抗滑桩桩后土拱效应的形成机理、土拱承载力及桩体最大荷载分担比等变化的规律,分析桩的大小、间距及土体颗粒细观参数等对土拱效应的影响,以期为抗滑桩的加固设计提供借鉴与参考.

1 PFC^{2D}颗粒流模型的建立

虽然抗滑桩的土拱效应具有三维空间特征,但三维分析计算的效率低、耗时长,抗滑桩的桩间土拱是一种水平拱,所以可将其简化为二维平面问题进行研究.由于对称性,取2根抗滑桩及其中心范围内的松散体为研究对象,假定松散体滑坡的滑动方向为水平方向,桩体位移为零且桩体可视为完全刚性,其分析模型见图1.图中: F_n 为法向力; F_s 为切向力; μ 为摩擦系数; D 为桩间净距离.模型横向为2根抗滑桩的中心间距,滑动方向的模型尺寸固定为6.5 m,抗滑桩截面长1.5 m,桩宽 b 为变量.桩身采用广义墙模拟,抗滑桩前面为临空面,滑坡后缘采用一个缓慢移动的光滑加载墙来模拟滑坡的蠕滑变形,滑动速度为10 mm/s,左、右边界用光滑墙模拟.通过颗粒流双轴试验与土体的室内土工试验的参数

对比,所确定的具体计算参数见表1.其中: ρ 为颗粒密度; d_{max} 为最大粒径; d_{min} 为最小粒径; n_0 为初始孔隙率; k_n 为法向刚度; k_s 为切向刚度.

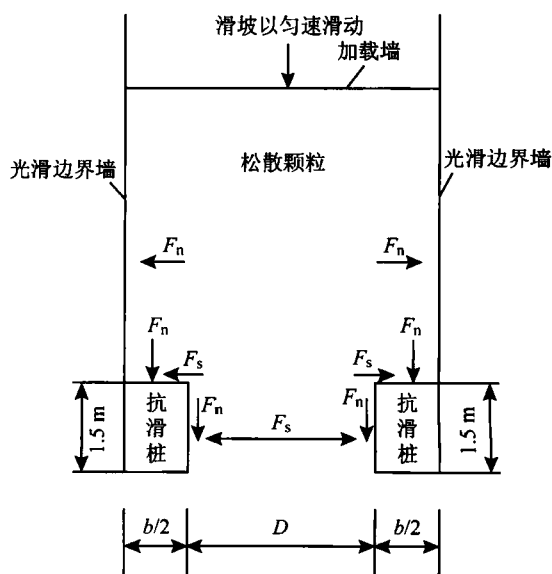


图1 松散体抗滑桩颗粒流计算模型

Fig. 1 PFC model of anti-slide pile in loose media landslide

表1 颗粒流模型计算参数

Tab. 1 Meso-parameters of particle flow model

颗粒类型	$\rho / (g \cdot cm^{-3})$	d_{max} / cm	d_{min} / cm	n_0	$k_n / (MN \cdot m^{-1})$	$k_s / (MN \cdot m^{-1})$	μ
松散体	2.0	4.0	2.0	0.16	30	30	0.57
抗滑桩	2.4	—	—	—	100	100	0.20
边界墙	—	—	—	—	100	100	—

2 土拱效应的形成演化过程分析

当成桩后加载墙以10 mm/s的速度匀速向前移动(模拟滑体蠕滑过程)时,记录加载墙荷载、桩体承担的荷载随加载墙位移变化的情况,图2示出了土拱的形成及发展过程.可见,当加载墙开始向前移动时,应力首先传递给加载墙前面的土体,而后逐渐传递给抗滑桩.图3为加载墙位移约1.0 cm时土体颗粒的速度矢量图和颗粒之间的接触压力图.图3(b)中,黑线表示土体颗粒间的接触力,线宽表示接触力的相对大小.可见,在抗滑桩周围,土体颗粒移动速度的大小和方向出现了较大变化,导致抗

滑桩附近的应力方向发生偏转,土体颗粒互相“楔紧”,成桩后土体形成了较为明显的应力土拱.随着加载墙位移增加,加载墙和桩体承担的荷载增大,土拱效应逐渐增强;当加载墙位移达到 7.0 cm 时,土拱效应最强,此时,加载墙荷载达到峰值,为土拱承担的极限荷载;随着加载墙位移进一步增大,加载墙和桩体承担的荷载迅速减小,土拱被破坏(土拱破坏的判别标准为成桩后颗粒发生较大规模坍塌,其承担的荷载急剧降低);当加载墙位移超过 16.0 cm 后,加载墙和桩体承担的荷载呈小幅度波动变化,表明此后土拱经历了破坏、形成、再破坏、再形成的协调循环变化过程,但后续承担的荷载比第 1 次形成

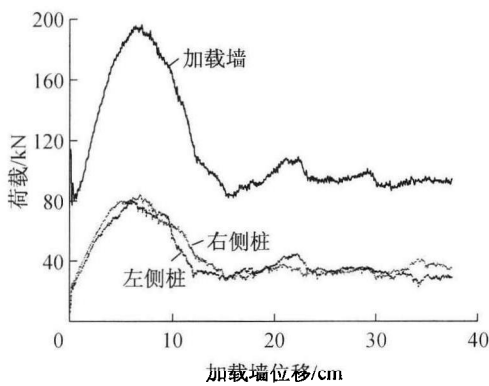
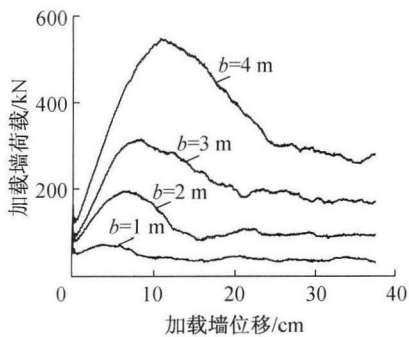
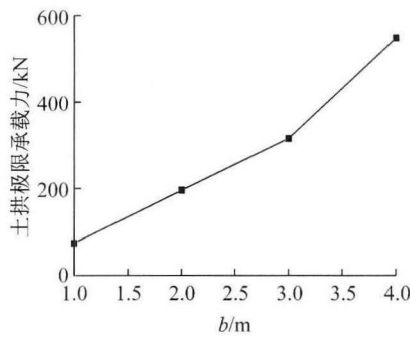


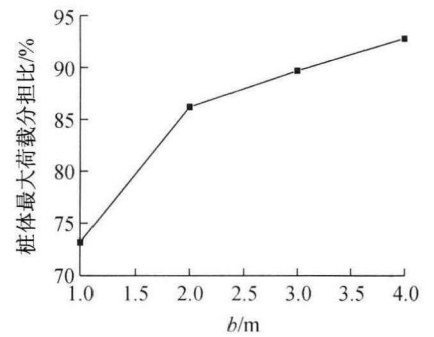
图 2 抗滑桩和加载墙的荷载随加载墙位移的变化
Fig. 2 Relationship between loads of piles, loading walls and displacement of loading walls



(a) 加载墙荷载与位移的关系



(b) 土拱极限承载力与桩宽的关系



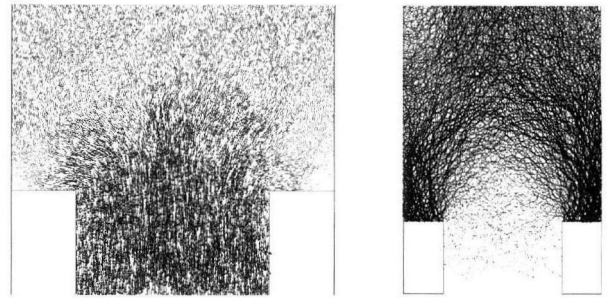
(c) 桩体最大荷载分担比与桩宽的关系

图 4 桩宽对土拱效应的影响

Fig. 4 Soil arching effect affected by pile width

3.2 桩间净距离

在 $b=2\text{ m}$ 、其他参数不变的情况下,通过改变桩间净距离来研究桩间净距离对土拱效应的影响,其结果见图 5.可见,随着 D 增大,土拱承担的极限承载力和残余承载力均减小,并且桩间净距越大,土拱达到极限承载能力后持续的时间越短.当 D 增大到一定程度后,由于桩体的遮拦作用变得很弱而较难形成土拱,最终使得抗滑桩的极限承载力和残余承载力趋于松散体本身的抗剪能力.



(a) 速度矢量图

(b) 接触压力图

图 3 土体颗粒的速度矢量和接触压力图

Fig. 3 Velocity vectors and contact pressure of soil particles

土拱时的峰值荷载(极限承载力)小得多,并形成了残余承载力,残余承载力虽有波动,但变化不大.

3 土拱效应的影响因素分析

3.1 桩宽

在 $D=3\text{ m}$ 、其他参数不变的情况下,通过改变桩身宽度 b 来研究其对抗滑桩土拱效应的影响,其结果见图 4.可见,土拱的极限承载力、残余承载力和桩体最大荷载分担比均随着桩宽的增大而增大.随着桩体宽度的增加,桩体的遮拦作用增强,加载墙荷载与位移关系的曲线变得高而胖,即桩体越宽,土拱承担的极限荷载越大,且土拱效应持续的时间越长.随着桩宽的增大,土拱的极限承载力持续增大,桩体最大荷载分担比先增大而后逐渐趋于平缓.

随着 D 不断增加,桩间土拱的极限承载力呈下降趋势,但并不呈简单的直线关系.当 D 从 1 m 增大到 2 m 时,桩间土拱承担的最大荷载由 346.8 kN 降为 234.2 kN,其变化率为 32.5%,即桩间土拱的极限承载力急剧下降;当 D 从 2 m 增大到 4 m 时,最大荷载由 234.2 kN 降至 157.4 kN,其变化率为 16.4%;当 D 从 4 m 增加到 6 m 时,最大荷载由 157.4 kN 降至 141.2 kN,其变化率仅为 5.1%,即土拱极限承载力的降幅较小;而当 $D>6\text{ m}$ 后,由于

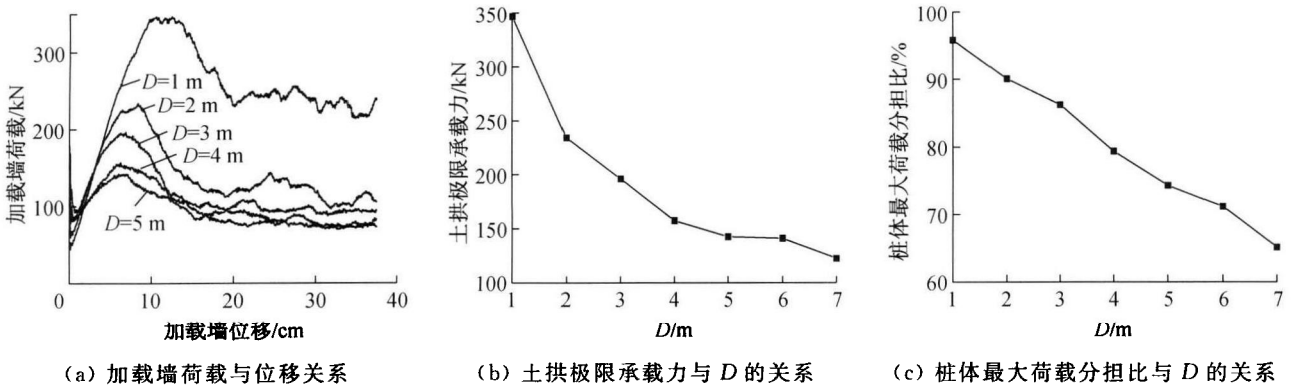


图5 桩间净距离对土拱效应的影响

Fig. 5 Soil arching effect affected by pile clear spacing

较难形成土拱(土拱效应减弱),土拱的极限承载力又开始急剧下降.同时,桩体最大荷载分担比随着 D 的增加也减小,这进一步说明桩间净距离越小,土拱效应越弱,桩体的遮拦作用也越弱.

在抗滑桩的设计中,确定合理的桩间净距离是关键.桩间净距离的大小直接关系到土拱能否形成,一旦桩间净距离大于某一值,桩间就不能形成土拱,大部分的荷载不能由桩体来承担,抗滑桩将失去遮拦作用;而桩间净距离过小,则工程造价太高.因此,从技术和经济的角度来讲,应该在保证桩体安全的条件下尽可能选择较大的桩间净距离.

3.3 摩擦系数

在 $b=2\text{ m}$ 、 $D=3\text{ m}$ 、其他参数不变的情况下,分别对颗粒摩擦系数 $\mu=0.57, 1.00, 1.50$ 的工况进行计算,所得摩擦系数对土拱效应的影响结果见图6.由图6可以看出,土体摩擦系数越大,抗滑桩的土拱效应越明显,土拱承担的极限承载力越大,并使得桩体最大荷载分担比呈增长趋势.在一定的条件下,摩擦系数是影响土拱的较为敏感参数,颗粒越粗糙,对土拱效应的影响越明显,但当摩擦系数达到一定值后,其对土拱效应的影响有所减缓.另外,颗粒表

面摩擦系数在一定程度上可表征为宏观上的松散土内摩擦角(摩擦角还受到颗粒间咬合等其他因素的影响).

3.4 孔隙率

PFC^{2D}程序属于二维程序,松散体颗粒材料的三维孔隙率与二维孔隙率的转换方法详见文献[12].

在 $b=2\text{ m}$ 、 $D=3\text{ m}$ 、其他参数不变的情况下,图7给出了松散体孔隙率 $n=0.16, 0.20$ 时,加载墙荷载随加载墙位移变化的情况.由图7可以看出,颗粒集合体孔隙率对成拱的影响显著.孔隙率越小,颗粒集合体越密实,越有利于发挥桩间土体的拱效应;而孔隙率越大,颗粒集合体越松散,成桩后土体在加载墙荷载作用下首先经历压密阶段,当达到一定密实度后才逐渐形成土拱,且密实度低的松散体的土拱极限承载力相当于密实度高的松散体的残余承载力.

另外,孔隙率的大小反映了初始应力的大小,颗粒流中生成的颗粒几何体不可能同时指定孔隙率和初始应力,较小的孔隙率意味着较大的初始应力.可见,在实际工程中,桩体不同深度处的截面初始水平应力不同,沿桩体各深度的成拱条件也不同.抗滑桩的土拱效应具有典型的三维特征.如浅部土体

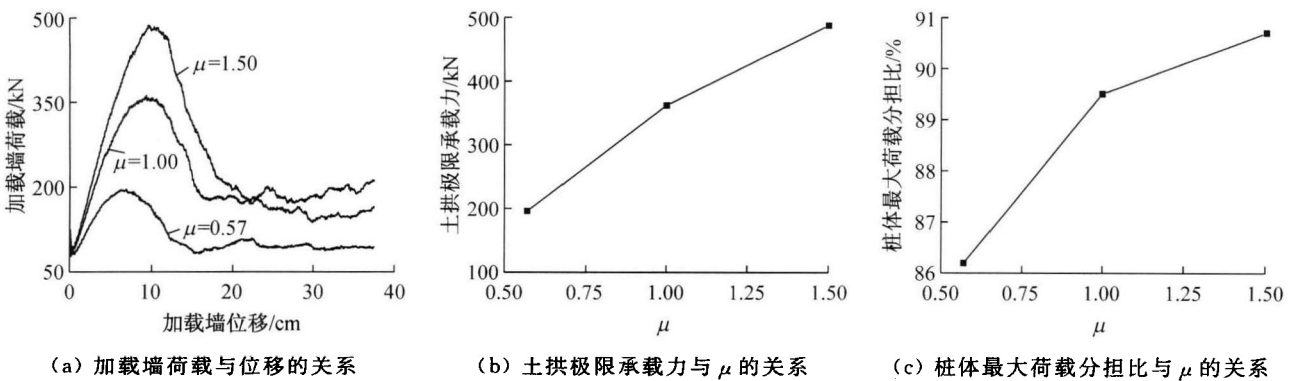


图6 摩擦系数对土拱效应的影响

Fig. 6 Soil arching effect affected by friction coefficient

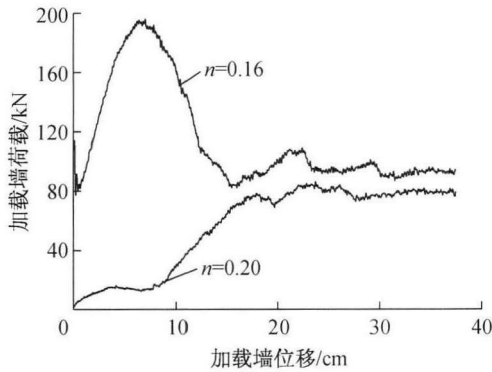


图 7 不同孔隙率下加载墙荷载与其位移之间的关系

Fig. 7 Relationship between loading walls and displacement of loading walls under different porosities

较难形成土拱,中部土体的土拱形状不如深部土体明晰。但在同一深度下,抗滑桩的土拱效应具有明显的平面特征,采用平面应变能够较好地模拟桩土相互作用的三维特征。

4 结 论

(1) 从滑坡开始滑动至土拱形成,抗滑桩产生土拱效应所承担的最大荷载为极限承载力;当土拱破坏后,后续产生的土拱效应所承担的最大荷载为残余承载力,残余承载力虽有波动但变化不大。

(2) 桩宽及桩间净距离对土拱的形成过程影响较大。桩宽越大,桩间净距离越小,桩体的遮拦作用越强,土拱的极限承载力、残余承载力和桩体荷载分担比越大,但并非呈简单的线性关系。

(3) 松散体滑坡的细观因素(孔隙率和摩擦系数)对其土拱效应的影响显著。摩擦系数越大,土拱效应越明显;孔隙率越小,颗粒集合体越密实,越有利于发挥桩间土体的拱效应,密实度低的松散体的土拱极限承载力相当于密实度高的松散体的残余承载力。

(4) 在松散体滑坡中选择抗滑桩设计及其布桩位置时,应考虑滑坡土体颗粒的细观因素,并尽可能以优化设计、节省投资为目标。

本文模型基于一定的假设前提(如假定桩体不发生位移),而对于考虑滑坡推力与滑动速度传递的差异以及桩体本身位移变化等问题尚须进一步深入研究。

参考文献:

[1] Terzaghi K. Theoretical soil mechanics [M]. New York: John Wiley and Son, 1943: 66-76.
 [2] Ladanyi B, Hoyaux B. A study of the trap door problem in a granular mass [J]. *Canadian Geotechni-*

cal Journal, 1969, 6(1):1-140.

- [3] 王成华,陈永波,林立相. 抗滑桩间土拱特性及最大桩间距分析[J]. *山地学报*, 2001, 19(6): 556-559.
 WANG Cheng-hua, CHEN Yong-bo, LIN Li-xiang. Soil arch mechanical character and suitable space between one another anti-sliding pile [J]. *Journal of Mountain Science*, 2001, 19(6): 556-559.
 [4] 贾海莉,王成华,李江洪. 关于土拱效应的几个问题[J]. *西南交通大学学报*, 2003, 38(4): 398-402.
 JIA Hai-li, WANG Cheng-hua, LI Jiang-hong. Discussion on some issues in theory of soil arch [J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2003, 38(4): 398-402.
 [5] 陶志平,周德培. 用抗滑桩整治滑坡地段隧道变形的模型试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(3): 457-460.
 TAO Zhi-ping, ZHOU De-pei. Model testing research on controlling tunnel deformation in landslide field with anti-slide piles [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(3): 457-460.
 [6] 张建华,谢强,张照秀. 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.
 ZHANG Jian-hua, XIE Qiang, ZHANG Zhao-xiu. Arching effect of anti-slide pile structure and its numerical simulation [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(4): 699-703.
 [7] 杨明,姚令侃,王广军. 抗滑桩宽度与桩间距对桩间土拱效应的影响研究[J]. *岩土工程学报*, 2007, 29(10): 1477-1482.
 YANG Ming, YAO Ling-kan, WANG Guang-jun. Study on effect of width and space of anti-slide piles on soil arching between piles [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2007, 29(10): 1477-1482.
 [8] 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, 29(3): 817-822.
 YANG Ming, YAO Ling-kan, WANG Guang-jun. Study of centrifuge model tests and numerical simulation on soil arching in space of piles [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(3): 817-822.
 [9] 吕庆,孙红月,尚岳全. 抗滑桩后土拱形状及影响因素[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2010, 42(4): 629-633.
 LÜ Qing, SUN Hong-yue, SHANG Yue-quan. Shape of soil arch behind anti-slide piles and its major influence factors [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2010, 42(4): 629-633.

(下转第 1389 页)

- terials using digital image processing [J]. **Computers and Geotechnics**, 2003, 30(5): 375-397.
- [10] 李世海, 汪远年. 三维离散元土石混合体随机计算模型及单向加载试验数值模拟[J]. **岩土工程学报**, 2004, 26(2): 172-177.
- LI Shi-hai, WANG Yuan-nian. Stochastic model and numerical simulation of uniaxial loading test for rock and soil blending by 3D-DEM [J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2004, 26(2): 172-177.
- [11] 赫建明, 李晓, 吴剑波, 等. 土石混合体材料的模型构建及其数值试验[J]. **矿冶工程**, 2009, 29(3): 1-5.
- HE Jian-ming, LI Xiao, WU Jian-bo, *et al.* Modeling method of the rock-soil aggregate and its numerical test [J]. **Mining and Metallurgical Engineering**, 2009, 29(3): 1-5.
- [12] 丁秀丽, 李耀旭, 王新. 基于数字图像的土石混合体力学性质的颗粒流模拟[J]. **岩石力学与工程学报**, 2010, 29(3): 477-484.
- DING Xiu-li, LI Yao-xu, WANG Xin. Particle flow modeling mechanical properties of soil and rock mixtures based on digital image [J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(3): 477-484.
- [13] 贾学明, 柴贺军, 郑颖人. 土石混合料大型直剪试验的颗粒离散元细观力学模拟研究[J]. **岩土力学**, 2010, 31(9): 2695-2703.
- JIA Xue-ming, CHAI He-jun, ZHENG Ying-ren. Mesomechanics research of large direct shear test on soil and rock aggregate mixture with particle flow code simulation [J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(9): 2695-2703.
- [14] Itasca Consulting Group. PFC^{2D} (particle flow code in 2 dimensions) fish in PFC^{2D} [R]. Minneapolis, USA: Itasca Consulting Group, 2008: 20-22, 83-85.

(上接第 1376 页)

- [10] 刘钦, 李地元, 刘志祥, 等. 水平推力作用下抗滑桩间土拱效应影响因素的数值分析[J]. **中南大学学报: 自然科学版**, 2011, 42 (7): 2071-2077.
- LIU Qin, LI Di-yuan, LIU Zhi-xiang, *et al.* Numerical analysis of influence factors on soil arching effect between anti-sliding piles under horizontal pushing loads [J]. **Journal of Central South University: Science and Technology**, 2011, 42 (7): 2071-2077.
- [11] 向先超, 张华, 蒋国盛, 等. 基于颗粒流的抗滑桩土拱效应研究[J]. **岩土工程学报**, 2011, 33 (3): 386-391.
- XIANG Xian-chao, ZHANG Hua, JIANG Guo-sheng, *et al.* Soil arching effect of anti-slide piles based on particle flow method [J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2011, 33 (3): 386-391.
- [12] 张刚, 周健, 姚志雄. 堤坝管涌的室内试验与颗粒流细观模拟研究[J]. **水文地质工程地质**, 2007 (6): 83-86.
- ZHANG Gang, ZHOU Jian, YAO Zhi-xiong. Study on mesomechanical simulation of piping with model tests and PFC^{2D} [J]. **Hydrogeology and Engineering Geology**, 2007 (6): 83-86.

(上接第 1381 页)

- [7] 蔡春, 张孟喜, 赵岗飞, 等. 带加强肋单向土工格栅的拉拔试验[J]. **岩土力学**, 2012, 33(1): 53-59, 64.
- CAI Chun, ZHANG Meng-xi, ZHAO Gang-fei, *et al.* Pull-out test of uniaxial geogrid with strengthening ribs [J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(1): 53-59, 64.
- [8] 邱成春, 张孟喜, 魏伟. 面应变条件下网格状带齿加筋砂的强度分析[J]. **岩土力学**, 2011, 32(S2): 313-318.
- QIU Cheng-chun, ZHANG Meng-xi, WEI Wei. Strength analysis of frictional failure of sand reinforced with grid-rib reinforcement under plane strain condition [J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(S2): 313-318.