

微型组合抗滑桩距径比的模型试验

石胜伟^{1,2}, 梁 炯^{1,2}, 韩新强^{1,2}, 李乾坤^{1,2}, 杨 栋^{1,2}

SHI Sheng-wei^{1,2}, LIANG Jiong^{1,2}, HAN Xin-qiang^{1,2}, LI Qian-kun^{1,2}, YANG Dong^{1,2}

1. 中国地质调查局地质灾害防治技术中心, 四川 成都 611734;

2. 中国地质科学院探矿工艺研究所, 四川 成都 611734

1. Technical Center for Geological Hazard Prevention and Control, CGS, Chengdu 611734, Sichuan, China;

2. Institute of Prospecting Technology, Chinese Academy of Geological Sciences, Chengdu 611734, Sichuan, China

摘要:针对碎石土滑坡沿基岩顶面滑移的问题,在平行布置 3 排微型组合抗滑桩进行加固的条件下,通过开展微型组合抗滑桩的模型试验和有限元分析,研究微型组合抗滑桩在不同距径比条件下土拱效应的形成特点与承载机理,在此基础上得出了最佳的距径比。结果显示,微型组合抗滑桩在一定的荷载作用下,首先沿受力方向第 1 排桩间形成土拱效应,然后随距径比的增加,依次在第 2 排、第 3 排桩上形成土拱效应,并且前排桩的荷载分担比明显大于后排桩的荷载分担比;当距径比小于 3 和大于 11 时,没有明显的或者不存在土拱效应,距径比为 7 和 8 时土拱效应最为理想。

关键词:微型组合抗滑桩;土拱效应;距径比

中图分类号:P642.22,P694

文献标志码:A

文章编号:1671-2552(2013)12-2008-07

Shi S W, Liang J, Han X Q, Li Q K, Yang D. Model research on the distance-to-diameter ratio of the micro-piles composite structure. *Geological Bulletin of China*, 2013, 32(12):2008-2014

Abstract: Aimed at solving the problem of gravel soil landslide slip along the bedrock surface, the authors studied the formation of the soil arching effect and the load-bearing mechanism under the condition of parallel arrangement of three rows of micro combined anti-slide pile reinforcement and according to the model test and finite element analysis. The result reveals the optimum distance-to-diameter ratio. As the result shows, in a certain load, the soil arching effect is first formed at the first row of micro-piles, and then with the increase of distance-to-diameter ratio, the soil arching effect is gradually formed at the second and third row; furthermore, load sharing ratio in the front row is significantly greater than that of the rear one. Soil arching effect is inconspicuous or non-existent when the distance-to-diameter ratio is less than 3 or greater than 11. The most ideal distance-to-diameter ratio is 7 and 8.

Key words: micro-piles composite structure; soil arching effect; distance-to-diameter ratio

在微型组合抗滑桩的承载机理与设计方法研究过程中,桩间距是一个重要的技术指标^[1]。目前一些研究者针对普通抗滑桩桩间距的问题进行了一些试验研究,如王成华^[2]等对抗滑桩间土拱形成机理及最大桩间距进行了研究;王士川^[3]等对抗滑桩间距的下限解进行了研究;王乾坤^[4]等对抗滑桩的桩间土拱和临界间距问题进行了探讨。以上研究主要是以普通抗滑桩为研究对象,其结果能否应用于微型组合抗滑桩体系尚需要进行验证和探讨。

针对微型组合抗滑桩桩间距的研究问题,笔者结合模型试验与工程实践提出了距径比(桩间距/桩径)的概念,认为微型组合抗滑桩存在充分发挥桩土共同作用的最佳距径比。鉴于土拱效应是表征抗滑桩桩土共同作用的一项重要技术指标,笔者首先利用数值模拟手段,分析了不同距径比条件下微型组合抗滑桩桩间土拱特性,得出比较合理的距径比,然后经过室内模型试验进行了验证,最终确定了最佳距径比的取值范围。在目前微型组合抗滑桩设计计

收稿日期:2013-06-28;修订日期:2013-09-10

资助项目:国家科技支撑计划项目课题(编号:2012BAK10B02)和中国地质调查局项目(编号:1212010814036)

作者简介:石胜伟(1972-),男,硕士,教授级高工,从事地质灾害防治技术研究及地质灾害调查评价。E-mail:163800@163.com

算方法还不成熟的条件下,最佳距径比的确定提高了该技术推广应用的可操作性,便于滑坡应急治理设计方案的快速制订。

笔者在开展微型组合抗滑桩距径比研究过程中,对前述的普通抗滑桩土拱效应研究成果能否直接应用于微型抗滑桩问题进行了验证,结果表明目前普通抗滑桩的土拱效应研究成果不能直接应用于微型组合抗滑桩。

1 微型组合抗滑桩距径比 FLAC 3D 有限元模拟分析

1.1 最佳距径比的概念

微型组合抗滑桩的最佳距径比是指能满足充分利用桩间岩土体自身承载力,且实现桩与岩土体变形协调的桩间距与桩直径的比值。

1.2 模型假定和模型的建立

针对碎石土滑坡沿基岩顶面的滑移问题,在平行布置 3 排微型组合抗滑桩进行加固的条件下,利用 FLAC 3D 软件计算得出位移场、应力分布场,进一步分析得出最佳距径比。微型组合抗滑桩在数值模拟中,作出以下假设:

(1)为了直观地反应桩间土位移情况和土拱效应的形成,在此假定桩为刚体,即水平方向位移为零。

(2)模型中桩间土位移也只研究沿滑动方向的水平位移。

本次计算模型的尺寸与物理试验模型的尺寸一致:滑床长 3m、宽 1.9m、高 0.3m,滑体总高 0.8m,宽 1.9m。本构模型材料参数是根据模型试验土体取样试验得出,土体为粘聚力(c)13kPa、内摩擦角(φ)33°的碎石土。滑坡推力根据物理模型试验加载时微型桩最大弹性变形对应的荷载 q 确定为 98kPa。滑坡推力按矩形分布,建模完成后,数值模拟三维模型如图 1 所示。

模型中微型桩桩径 d 为 2cm,距径比取整数,对应桩间距 s 取值如表 1 所示。

本构模型和结构单元的参数选取是根据物理模型试验现场取样测试取值,取值如表 2~4 所示。

1.3 有限元模拟结果分析

通过 FLAC 3D 有限元模拟,得出不同距径比条件下微型组合抗滑桩的主应力和位移云图(图 2)。

分析不同距径比条件下微型组合抗滑桩的主应力云图和位移云图得出,在施加的推力荷载作用下,

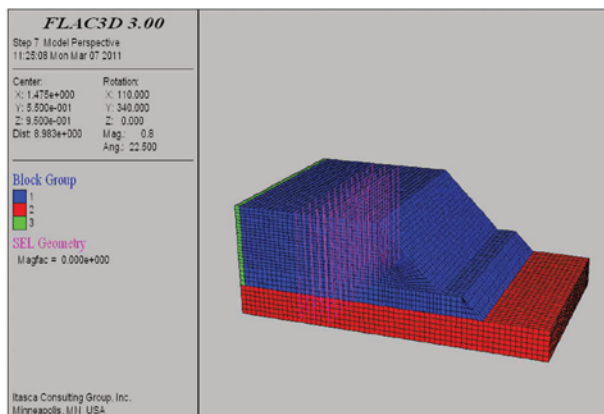


图 1 有限元三维模型

Fig. 1 Model of 3D finite element

桩后土体被挤压,由于桩体刚体大,形成桩和土体产生相对位移或相对位移趋势,并形成桩间土体不均匀位移,从而产生土拱。由此可以得出桩间土成拱的效应机制:当土体发生相对于桩的运动或者运动趋势时,土拱效应就会产生,在桩后土层形成应力拱,在桩前形成位移拱。

由距径比为 5 的主应力和位移云图(图 2-a、b)可以分析得出,当距径比为 5 时没有形成明显的应力拱,但是沿受力方向第 1 排桩有明显的位移拱形成,第 2 排次之,第 3 排则没有形成位移拱。

当距径比为 7 和 8 时,形成了理想的应力拱和位移拱(图 2-c~f),说明此时 3 排桩协同受力,且都起到抗滑效果,并且第 3 排桩后的应力和位移都趋于平衡和稳定,是最为理想的治理效果。

当距径比为 10 时,虽然 3 排桩生成了明显的应力拱和位移拱(图 2-g、h),但是第 3 排桩后有明显的应力集中和位移变化,疑似桩间土有绕桩运动。

当距径比为 11 时,虽然在桩的位置有应力集中的现象,但是没有形成明显的应力拱(图 2-i、j)。3 排桩都形成明显的位移拱,但是第 3 排桩后位移变形较大,桩间土有明显的绕桩运动。

表 1 桩间距取值

Table 1 Value of distance between piles

距径比 s/d	3	5	6	7	8	9	10	11	13	15
桩间距 s/cm	6	10	12	14	16	18	20	22	26	30

表 2 本构模型参数取值
Table 2 Value of constitutive model

类型	弹性体积模量 K/MPa	弹性剪切模量 G/MPa	抗拉强度 σ/kPa	内聚力 c/kPa	内摩擦角 $\phi/^\circ$	重力加速度 $g/\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$	密度 $\rho/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
滑体	4.01	3.6	1.0	13.0	33.0	-9.8	1680
滑面				2.0	10.0		
滑床	1.11×10^5	8.33×10^4					

表 3 结构单元材料计算参数
Table 3 Structural unit material parameters

结构单元	弹性模量 E/MPa	泊松比 μ	横截面积 $/\text{m}^2$	外圈周长 $/\text{m}$
桩	8×10^4	0.25	3.14×10^{-4}	0.0628

由以上分析可知,针对碎石土滑坡沿基岩顶面滑移的问题,在平行布置 3 排微型组合抗滑桩进行加固的条件下,微型组合抗滑桩最佳距径比为 7~8,此时在桩径为 2cm 时对应的最佳桩间距为 14~16cm。

2 物理模型试验对最佳距径比的验证

2.1 试验设计

以碎石土为滑坡介质建立滑坡试验模型,人工预设水平滑面。通过对试验模型的水平逐级加载,分析从弹性变形到塑性变形直至破坏过程中桩身及土体的应变及应力变化,为研究微型组合抗滑桩的承载机制及桩与土的作用机制提供依据,重点研究微型组合抗滑桩最佳距径比的选取。

2.1.1 试验设备

微型组合抗滑桩室内模型试验设备,由加载系统和模型箱(图 3)组成。模型箱长度 3.6m,宽度 2.0m,高度 2.0m;加载系统由量程为 300kN 的一对水平加载千斤顶和高精度液压伺服控制系统组成。

2.1.2 模型尺寸

滑坡模型中滑床长 3m、宽 1.9m、高 0.3m;滑体总高 0.8m,宽 1.9m。设置 3 排桩,每排桩横向 11 列,共 33 根,桩径为 2cm,桩间距按照距径比 7.5 设置,为 15cm。设置了微型组合抗滑桩的滑坡模型剖面与平面,如图 4 所示。其中,相似比的选取等遵循三大相似定律^[9]。

2.1.3 模型材料

滑体:本次试验的滑坡模型模拟碎石土滑坡,选

用细石土分层夯填制作滑体。

滑床、滑带:滑床为 C15 混凝土,厚 30cm;在滑床顶面铺设双层聚乙烯塑料薄膜模拟滑面。

微型组合抗滑桩:模型桩采用钢管预埋制成,桩径为 $\phi 20\text{mm}$,桩长 110cm,滑坡模型制作完成后在钢管内注入水泥砂浆。

2.1.4 边界及荷载

试验模型的边界条件为左右两侧水平位移固定,底部竖直位移固定,坡面临空。2 个水平加载千斤顶作用在推板上,给试验模型施加水平推力,模拟矩形滑坡荷载。

2.2 桩间土压力测试及结果分析

室内模型试验中,如图 4 所示在 1 号桩和 2 号桩之间,在滑面 10cm(1 号压力盒)和 60cm(2 号压力盒)2 处分别埋设 1 个压力盒,根据土压力的变化来判断土拱效应的生成。

模型试验中微型桩桩间土压力测试结果如图 5 所示,滑面上 10cm 处,荷载从 10kN 增大到 50kN 时桩间土压力急剧增大。因为在荷载作用下,微型组合抗滑桩阻碍滑坡土体位移的同时,也使自身产生运动趋势,滑坡土体也有向坡体外侧运动的趋势。荷载从 50kN 增加到 115kN 时桩间土压力变缓,几乎不再增大。因为微型组合抗滑桩的水平位移小于滑坡土体的水平向位移,造成桩后部位的土体挤压桩体,使桩后土压力不均匀分布。桩周围的土体由于桩体对其约束作用较大而剥落较少,反之离桩体较远的土体由于约束小而剥落较大。在这种情况下,桩周围土体压力增大,而在两桩中间土体压力增大不明显,因此形成了明显的土拱效应。加载到 115kN 以上时桩间土发生了破坏,滑体失稳。

滑面上 60cm 处桩间土压力的变化特征没有滑面上 10cm 处明显,说明微型桩具有柔性支护的特征,随着荷载的增加桩体会随着土体一块产生运动,

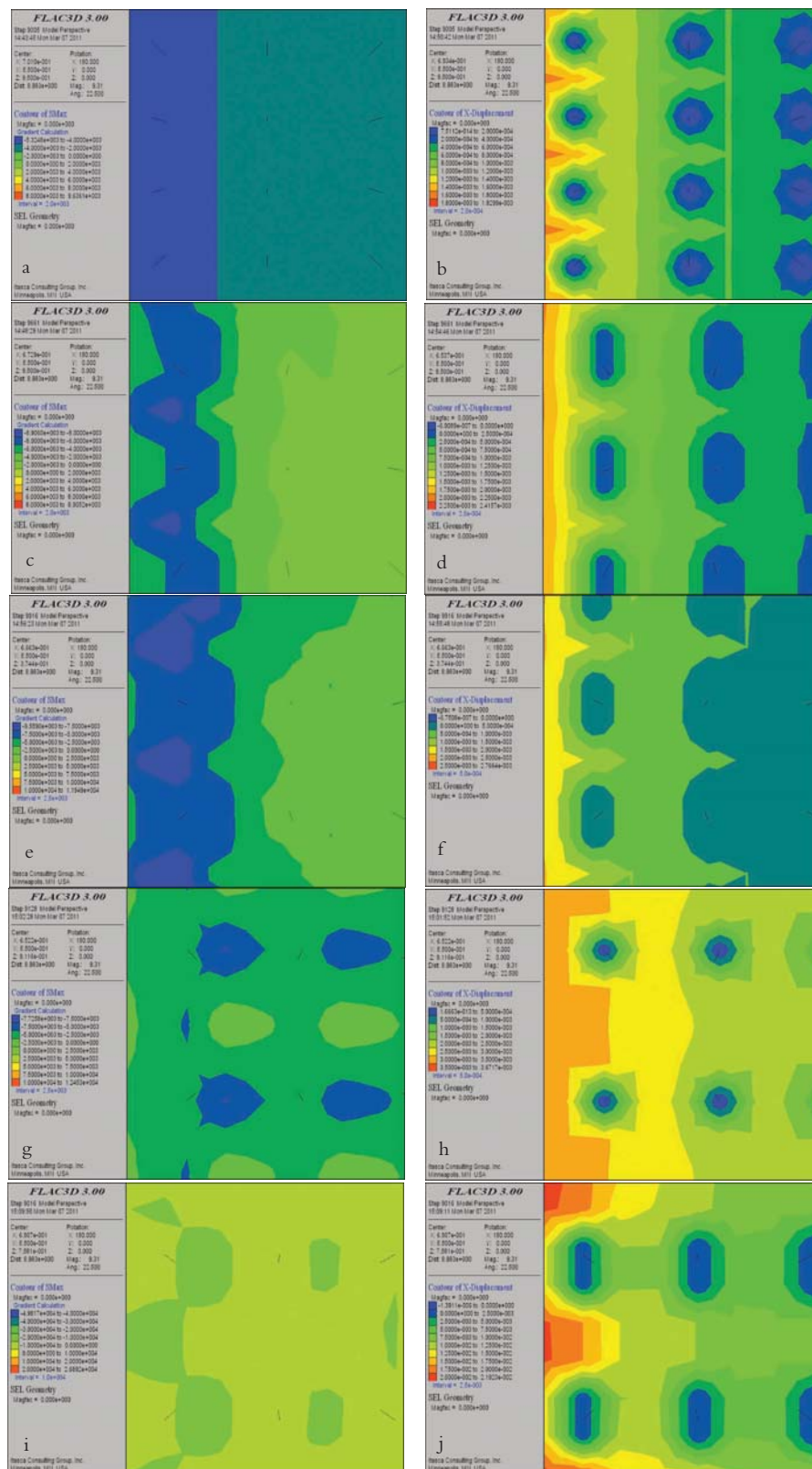


图 2 距径比分别为 5、7、8、10、11 的主应力和位移云图

Fig. 2 Contour of principal stress and displacement for distance-to-diameter ratio of 5, 7, 8, 10, 11

a, c, e, g, i—路径比为 5、7、8、10、11 的主应力云图; b, d, f, h, j—路径比为 5、7、8、10、11 的位移云图



图3 模型箱以及微型桩的布置

Fig. 3 Model box and layout of micro-piles

同时又受土拱效应的影响,土压力一直不大且没有产生明显增大的趋势^[6]。

以上结果说明,模型试验中桩间距按照距径比 7.5 设置非常合理,此时在桩径为 2cm 时对应的最佳桩间距为 15cm,产生了理想的土拱效应。

3 普通抗滑桩土拱效应计算模型验证

普通抗滑桩桩间土拱效原理如图 6 所示。因土拱效应在桩后土体一定高度范围内均有产生,而滑面以上的土拱对于桩体发挥抗滑效果是最重要的^[7],所以取滑面上方的土拱为主要的研究对象,进行分析并建立模型计算。

模型试验中采用钢管注浆微型组合抗滑桩支护体系,重点讨论圆形截面微型组合抗滑桩的情况。鉴

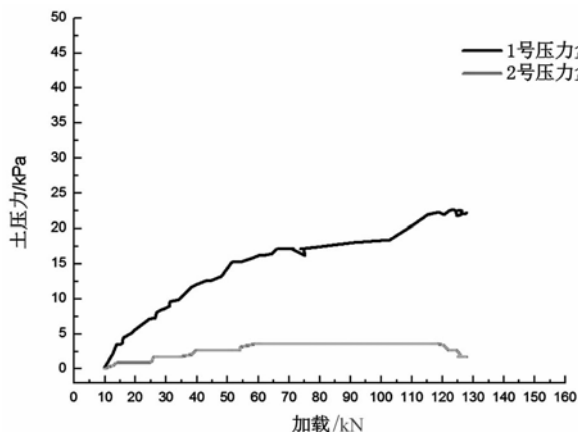


图5 桩间土压力分布

Fig. 5 Force distribution between piles

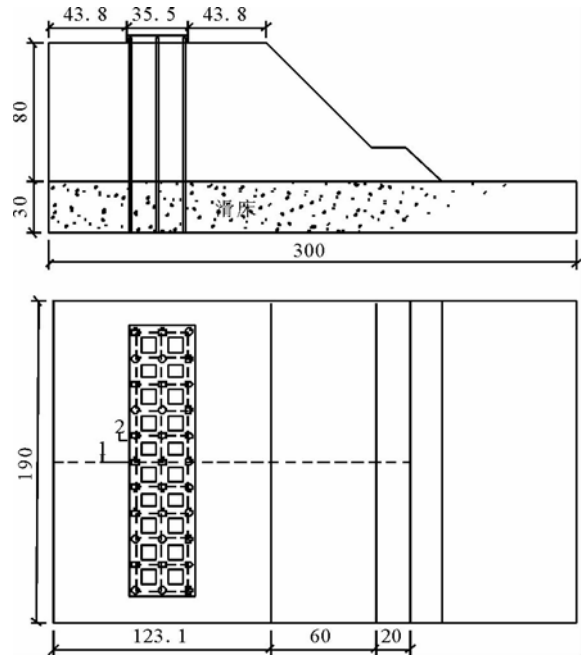


图4 试验模型设计尺寸(单位为 cm)

Fig. 4 Design size of test model

于土体拉应力较小、可以忽略不计的材料特性,作如下假定:

(1)相邻的两桩为拱脚,假设拱脚为铰支座,没有转动约束。

(2)假设桩后滑坡推力(q)沿滑动方向均匀分布,桩前土对桩的抗力为零。

(3)假设土拱横截面厚度不变,土拱可以简化为平面的应变关系问题。

3.1 拱脚截面应力

普通抗滑桩桩间土拱横截面的正应力在拱脚位置最大,拱脚是土拱最易破裂的位置。取垂直方向单位高度的土拱为研究对象,如图 7 所示。

图 7 中, τ 为拱脚处土拱破裂面的剪应力; σ 为拱破裂面的正应力; r 为桩的半径; β 为方位角; α 为破坏面和轴向压力法平面的交角; θ 为土单元内剪

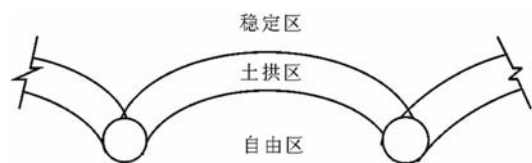


图6 桩间土拱效应原理

Fig. 6 Illustrative diagram for soil arching effect between piles

破面 ACC' 与最大主应力面的夹角。

$$\text{拱脚处破裂面面积为: } S = \frac{r}{\tan\beta} \quad (1)$$

拱脚处土拱破裂面水平 x 和垂向 y 方向的静力平衡方程为:

$$\begin{cases} \frac{ql^2}{8f} = (\sigma \cos\beta - \tau \sin\beta) \frac{r}{\tan\beta} \\ ql = 2(\sigma \sin\beta - \cos\tau\beta) \frac{r}{\tan\beta} \end{cases} \quad (2)$$

式中, l 为土拱跨度(桩间距), f 为拱高, q 为作用于单位高度土拱上的分布压力, 由上式得出:

$$\begin{cases} \tau = \frac{ql \sin\beta (4f \tan\beta + l)r}{8fr} \\ \sigma = \frac{ql \sin\beta (4f - l \tan\beta)r}{8fr} \end{cases} \quad (3)$$

$$\text{则: } \frac{\sigma}{\tau} = \frac{q4f \tan(\beta+l)}{4f - l \tan\beta} \quad (4)$$

又因: $\sigma \tan\theta = \tau$

$$\text{所以得出: } \frac{l}{f} = \frac{\tan(\beta+\theta)}{4} \quad (5)$$

3.2 桩间距计算

桩间土体抗剪指标参数选取是根据物理模型试验现场取样测试取值, 取值如表 4 所示。

如果保证土拱最危险破裂位置不发生破坏, 就能保证桩间有效土拱的形成和土拱各截面位置不破坏。因此, 拱脚处应力状态必须满足 Mohr-Coulomb 屈服强度条件:

$$\tau \leq \tau_f = c + \sigma \tan\varphi \quad (6)$$

式中 c 为滑体土体内聚力(kPa); φ 为滑面摩擦角(°)。代入安全系数 K , 把各参量代入式(6)中, 得:

$$\begin{aligned} Kq \sin(4\frac{f}{l} - \tan\beta) &= 8\frac{f}{l} cr \frac{1}{l} + \\ q l \sin\beta (4\frac{f}{l} \tan\beta + 1) \tan\varphi \end{aligned} \quad (7)$$

然后, 由 Mohr-Coulomb 强度准则得出, 土单

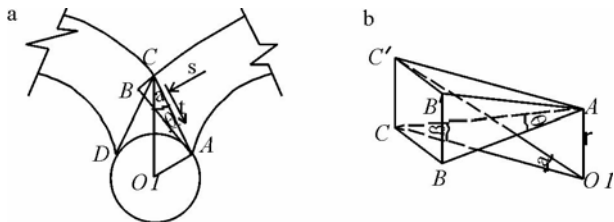


图 7 土拱拱脚应力关系

Fig. 7 Stress relationship for soil arch foot
a—土拱拱脚受力图; b—各截面空间关系

元最大主应力面与内剪破面的夹角(θ)为 $45^\circ - \frac{\varphi}{2}$, 所以,

$$\theta = 45^\circ - \frac{\varphi}{2} \quad (8)$$

综上分析, 参数 θ 代入(5)可得出 $\frac{l}{f}$ 。由于安全

系数 K 已知, 可通过(7)计算出桩间距 l 。

本次微型组合抗滑桩室内模型试验中微型桩直径为 2cm, 桩长为 110cm, 悬臂段长度 80cm, 滑面倾斜角 0° , 试验中进行分级加载, 桩后平均压力为 39.9kPa, 取安全系数为 1.25, 代入式(7)可计算出 l 为 9.37cm。

3.3 计算结果分析

根据普通抗滑桩桩间土拱效应计算的桩间距是 9.37cm, 而前述数值分析与模型试验验证表明, 微型组合抗滑桩形成理想土拱效应达到最佳距径比时的桩间距约为 15cm, 两者相差 1.5 倍左右, 表明普通抗滑桩土拱效应的研究成果不能直接应用于微型组合抗滑桩。

微型组合抗滑桩产生有效土拱效应的桩间距比普通抗滑桩大的原因, 应该与微型桩柔性结构体系及多排多列组合形态形成的三维空间土拱效应有关。

4 结 论

针对碎石土滑坡沿基岩顶面滑移问题, 在平行布置 3 排微型组合抗滑桩进行加固的条件下, 通过数值模拟与物理模型试验, 得出以下研究结论。

(1) 微型组合抗滑桩在一定的荷载作用下, 首先会在沿受力方向第 1 排桩间形成土拱效应, 然后随着距径比的增加, 依次会在第 2 排、第 3 排桩上形成土拱效应。

(2) 同一距径比的情况下, 沿受力方向前排桩间土拱效应较后排桩的土拱效应明显, 说明前排桩的荷载分担比明显大于后排桩的荷载分担比。

表 4 桩间土体取样测试参数

Table 4 Value of constitutive soil

含水率 ω	密度 ρ_l $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	孔隙比 e	孔隙率 n	内聚力 C/kPa	内摩擦角 $\phi/^\circ$
24.2	1680	0.672	40	13.0	33.0

(3)微型组合抗滑桩距径比过小,桩间土体土拱效应不明显,其效果类似于一道挡墙,虽能起到抗滑效果,但是没有调动岩土体承载,同样滑坡推力条件下需要投入的工程量大,造价高。

(4)微型组合抗滑桩桩距径比过大,桩间土体就不会出现有效的土拱效应,土体会发生绕桩运动或从桩间溜滑,此时桩也不能起到有效的抗滑作用。

(5)按平行方式布置的3排微型组合抗滑桩的距径比小于3或大于11时,没有明显的或者不存在土拱效应,距径比为7~8时最为理想。

(6)模型试验采用7.5的距径比,形成了理想的土拱效应,说明数值模拟结果确定的最佳距径比范围在7~8是可靠的;对于其它组合模式及不同滑体类型条件下微型组合抗滑桩最佳距径比的取值,还有待进一步的研究。

(7)经过数值分析与模型试验验证,微型组合抗滑桩形成理想土拱效应达到最佳距径比时的桩间距,是按普通抗滑桩土拱效应计算的桩间距的1.5倍左右,表明普通抗滑桩土拱效应的研究成果不能直接应用于微型组合抗滑桩,微型组合抗滑桩存在

多排桩之间的三维空间土拱效应问题,后续还需进行深入的研究。

致谢:国土资源部地质灾害应急技术指导中心总工程师殷跃平研究员对本文给予了技术指导,中国地质大学(武汉)工程学院2008级硕士研究生邹振参与了部分室内模型试验工作,在此一并表示感谢。

参考文献

- [1]周德培,肖世国,夏雄.边坡工程中抗滑桩合理桩间距探讨[J].岩土工程学报,2004, 26(1): 132-135.
- [2]王成华,陈永波,林立相.抗滑桩间土拱力学特性与最大桩间距分析[J].山地学报,2001, 19(6): 556-559.
- [3]王士川,陈立新.抗滑桩间距的下限解[J].工业建筑,1997, 27(10): 32-36.
- [4]王乾坤.抗滑桩的桩间土拱和临界间距问题的探讨[J].武汉理工大学学报, 2005, 27(8): 64-68.
- [5]杨俊杰.相似理论与结构模型试验[M].武汉:武汉理工大学出版社, 2005.
- [6]吴顺川,高永涛,金爱兵.失稳高陡路堑边坡桩锚加固方案分析[J].岩石力学与工程学报, 2005, 24(21): 3954-3958.
- [7]Mohammed Awad D R. Lateral ad Tests on Mini-piles[J]. Islamic University Journal,1999, 7(1): 15-33.