

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2014.02.036

超载作用下边坡-抗滑桩体系 稳定性及土拱效应研究

年廷凯¹, 徐海洋², 李东晨³, 刘 博¹

(1. 大连理工大学 土木水利学院 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024;

2. 深圳治建院建筑技术有限公司, 广东 深圳 518054; 3. 中南电力设计院, 湖北 武汉 430071)

摘 要: 为深入研究坡顶超载环境下抗滑桩加固边坡的整体稳定性, 依据现行地基规范并结合地基承载力理论, 取均布超载强度 q 计算抗滑桩-边坡体系的安全系数和桩身内力分布。在此基础上, 讨论坡顶超载外边缘线至坡顶不同水平距离 L_q 对加固后边坡稳定性的影响, 将边坡顶部均布超载视为埋深为零的条形基础, 考察不同超载强度和超载作用位置条件下边坡的整体稳定性及桩间土拱效应。研究表明: 抗滑桩-边坡体系在特定的桩间距范围内形成土拱, 坡顶不同超载强度和超载作用位置影响着桩间土拱的分布、发展及破坏规律, 土拱效应集中反映了抗滑桩的作用机制和加固效果。

关键词: 边坡; 抗滑桩; 强度折减法; 局部超载; 土拱效应; 安全系数; 桩身内力

中图分类号: TU413.6⁺2

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2014)02-0177-06

Research on Stability and Soil Arching Effect of Slope-pile System under Uniform Surcharge

NIAN Ting-kai¹, XU Hai-yang², LI Dong-chen³, LIU Bo¹

(1. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, College of Civil and Hydraulic Engineering,

Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China; 2. Shenzhen YJY Building Technology Co., Ltd.,

Shenzhen, Guangdong 518054, China; 3. Central South Electric Power Design Institute, Wuhan, Hubei 430071, China)

Abstract: The local surcharge is usually regarded as the bar foundation on ground surface. To investigate the influence of the local surcharge on the stability and failure mechanism of slope-pile system, a series of uniformly distributed surcharge q is illustrated to numerically solve the safety factors of stabilized slopes and the internal forces along reinforcing piles combined with the formula of the subsoil bearing capacity in foundation code. Moreover, the different horizontal distance L_q (from the outside edge line of uniformly distributed surcharge to the top of slope) under a given local surcharge is utilized to discuss this problem in detail. In particular, the intensity and position of the uniformly distributed surcharge on the top of slope are also taken to study the slope stability and the soil arching effect between adjacent piles. The results show that when the anti-slide piles are inserted in a potential sliding slope subjected to a local surcharge, the soil arching will occur in a certain pile spacing. The intensity and position of locally uniform surcharge will influence the distribution, process and failure mechanism of soil arching as well as the working performance of anti-slide piles to a certain extent.

Keywords: slope; anti-slide pile; strength reduction method; local surcharge; soil arching effect; safety factor; internal force of pile

边坡问题复杂多变, 如特殊几何形状边坡、涉水
边坡、地震或超载作用下的边坡等。正是由于它的

复杂性, 近年来涌现出许多新的分析理论和计算方
法来求解边坡及抗滑桩加固边坡的稳定性问题, 其

收稿日期: 2013-12-04

修稿日期: 2014-02-16

基金项目: 国家自然科学基金(51179022); 中央高校基本科研业务费专项基金(DUT12LK019)

作者简介: 年廷凯(1971—), 男, 辽宁庄河人, 博士, 副教授, 博士生导师, 主要从事岩土体稳定性与防灾工程方面的教学和研究。

中有限元强度折减法是最具代表性的边坡稳定性评价方法。该方法最早由 Zienkiewicz 等提出^[1],后被广泛采用并得到推广。该法通过有限元数值分析可同时获得边坡稳定安全系数(*FOS*)和临界破坏机构,不仅保持了数值方法模拟复杂问题的优点,而且概念明确,结果直观。郑颖人等^[2]利用有限元强度折减技术,采用力和位移的收敛标准作为边坡破坏的判据,提出的摩尔-库仑等面积圆屈服准则求得的稳定安全系数,并证实了其适用于工程的可行性。Chen 等^[3]提出将有限元和无限元相结合,来探究水平推力作用下桩-土相互作用机制和各类因素对侧向受荷桩性能的影响。Nian^[4]等考虑边坡土体的非均质性和各向异性,基于强度折减上极限分析方法来评价抗滑桩加固边坡的稳定性,并指出抗滑桩的最优加固位置。Pradel 等^[5]在优化抗滑桩加固位置的基础上,采用强度折减法获得了边坡的安全系数。实际工程中,会遇到各类复杂的边坡问题,如高速公路或铁路边坡、邻近建筑物边坡、开挖深基坑边坡、各类堤坝(如河堤、库岸边坡、码头岸坡、土石坝)等,多采用抗滑桩实施加固^[6]。同时这类加固边坡往往也受到坡顶局部荷载作用,如交通荷载、建筑荷载、临时或长期堆载等。针对抗滑桩-边坡体系,众多学者进行了相关研究。Liang 等^[7]采用有限元强度折减法,系统分析了抗滑桩的桩间距与桩后荷载间的相对关系,揭示了高摩擦无粘性土坡中桩间土拱效应显著这一现象。Chen 等^[8]采用二维和三维有限元模型,开展了桩土相互作用研究,提出土体剪胀角对土拱效应的影响,群桩效应在桩间距大于 4 倍桩径时不再明显。吕庆等^[9]用桩间土体的最大主压应力迹线来描述土拱效应,认为桩间距为 4.46 倍桩径时,抗滑桩加固效果最优。赵明华等^[10]针对不同的边坡坡角与桩间斜拱效应,得到了合理桩间距的计算公式。Liang 等^[11]假定抗滑桩嵌入稳定地层中,应用三维数值方法深入探讨了抗滑桩间土拱效应及各参数对土拱效应的影响。此外,戴自航等^[12]提出了求解弹性抗滑桩内力的新模式,并基于有限差分法进行了求解;年廷凯等^[13]针对坡顶斜向受荷桩进行了室内模型试验,研究了其桩基及边坡的工作性能。而超载-边坡-抗滑桩体系问题,现行规范和当前研究还很少涉及,亟需开展针对性研究。为此,依据地基规范并结合地基承载力理论,开展了不同超载强度和超载位置下抗滑桩-边坡体系稳定性、桩-土相互作用机制及桩间土拱效应研究,以期为建筑地基规范的修订和抗滑桩加固边坡的工程设

计提供科学的依据。

1 计算模型和材料参数

应用 Mohr-Coulomb 模型模拟土体材料,折减后的抗剪强度参数可分别表达为

$$c'_m = c' / SRF \tag{1}$$

$$\varphi'_m = \arctan\left(\frac{\tan\varphi'}{SRF}\right) \tag{2}$$

式中: c' 和 φ' 分别为边坡土体的有效黏聚力和内摩擦角, c'_m 和 φ'_m 是边坡土体实际发挥的抗剪强度, SRF 为强度折减系数。

抗滑桩-边坡体系的岩土参数详见表 1。计算模型尺寸及边界条件如图 1 所示,其中坡顶均布超载 q ,超载作用宽度为 B ,其外边缘距坡顶的水平距离为 L_q 。边坡几何尺寸及岩土组构参数具体如下:坡度为 1:1.5,边坡高 $H = 10\text{ m}$,坡体水平长度 $L_2 = 15\text{ m}$,坡后缘长度为 $L_1 = 15\text{ m}$,前缘长度为 $L_3 = 10\text{ m}$,不稳定土层厚度为 $H_u = 15\text{ m}$,稳定地层厚度为 $H_s = 5\text{ m}$,模型宽度取 $W = 6.0\text{ m}$;抗滑桩距坡脚的水平距离为 $L_x = 7.5\text{ m}$,桩形心距为 $S = 3.0\text{ m}$,桩径为 $D = 1.0\text{ m}$,桩长为 $L_p = 13.0\text{ m}$,即抗滑桩嵌入稳定地层(岩层)约 2.5 m;均布超载 q 作用宽度为 $B = 3.0\text{ m}$,其外边缘距坡顶水平距离为 $L_q = 0\text{ m}$ 。

表 1 抗滑桩-边坡体系岩土参数

材料参数	重度 /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	黏聚力 /kPa	摩擦角 /($^\circ$)	剪胀角 /($^\circ$)	变形模量 /MPa	泊松比
土层	20.0	10	20	0	20	0.25
岩层	27.5	—	—	—	30000	0.20
桩	24.0	—	—	—	30000	0.20

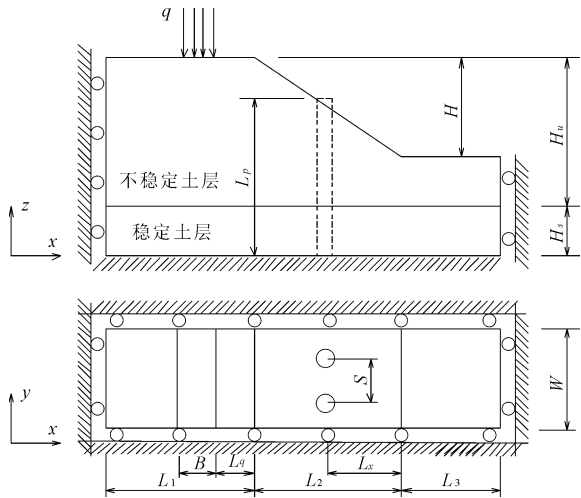


图 1 坡顶荷载作用下的计算模型尺寸图

(上图:立面图;下图:平面图)

当均布超载作用于坡顶时,可视边坡顶面为水

平地基。根据规范第 5.2.5 条^[14],可利用土体的抗剪强度指标确定地基承载力特征值 f_a ,具体表达式见式(3)。

$$f_a = M_b\gamma b + M_d\gamma_m d + M_c c_k$$

(3)

式中: M_b 、 M_d 和 M_c 为地基承载力系数,其值可通过土的内摩擦角 φ 查得; γ 和 γ_m 分别代表基底以上和基底以下土的加权平均重度; b 和 d 分别为基础底面的宽度和埋深; c_k 为土体的黏聚力标准值。利用表 1 提供的有关参数可求得边坡顶面地基的承载力特征值为 $f_a = 87.2 \text{ kPa}$ 。

2 不同坡顶均布超载对加固效果的影响分析

2.1 荷载大小对加固效果的影响分析

取坡顶超载 q 依次为 20 kPa、40 kPa、60 kPa、80 kPa,计算抗滑桩加固边坡 FOS 及桩身内力分布情况。

利用大型有限元软件 abaqus 开展抗滑桩加固边坡的强度折减数值计算,其中土体采用服从 Mohr-Coulomb 破坏准则与非关联流动法则的理想弹塑性本构模型。抗滑桩视为线弹性体,桩土间采用基于接触相互作用的摩擦模型,摩擦系数假定为 0.3。抗滑桩、桩周土均采用六面体减缩积分单元(C3D8R),环绕桩周土体局部加密网格。

进一步地,将桩体的弹性模量加到 60 000 MPa,土体的变形模量增加到 200 MPa,计算桩间距 $S = 3.0 \text{ m}$,桩径 $D = 0.8 \text{ m}$ 时的边坡 $FOS = 1.732$,与 Wei 等^[15]有限差分解 1.72 相一致,从而验证了本文方法的正确性。变化坡顶的超载强度 q ,计算不同 q 下边坡的 FOS 列于表 2。分析表 2 可见,随着 q 的增加,边坡 FOS 逐渐减小;当 $q = 80 \text{ kPa}$ 时,边坡的 $FOS = 1.195$,已经接近该边坡在未采取抗滑加固措施时的安全系数,此时抗滑加固正效应与超载负效应已完全抵消。

表 2 不同超载强度 q 下的边坡安全系数 FOS

参数	超载强度 q/kPa				
	0	20	40	60	80
安全系数 (FOS)	1.540	1.445	1.354	1.270	1.195

图 2 给出边坡 FOS 随坡顶超载强度 q 变化曲线以及在超载宽度为 3.0 m 时,基于变化强度折减系数 SRF 时由式(3)所得出的地基承载力特征值 f_a 变化曲线。

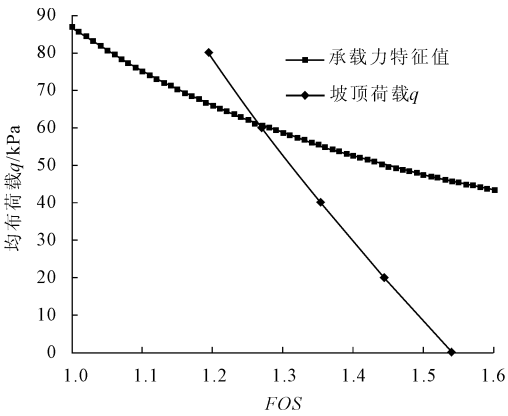


图 2 不同超载强度下边坡的安全系数 FOS

由图 2 可见,随着超载强度由 0 增加至 80 kPa,边坡的 FOS 逐渐减小,且呈线性递减规律,总体上边坡仍处于安全状态。当边坡受到局部超载作用时,桩侧的土压力也相应增大,随着边坡土体强度参数的不断折减,将导致抗滑桩无法阻挡潜在滑坡土体,可能造成边坡失稳乃至破坏。观察图 2 中地基承载力特征值 f_a 与强度折减系数 SRF 的变化曲线可以看出,该曲线与坡顶超载强度曲线相交于一点,此处为 $q = 60 \text{ kPa}$,由此推测当坡顶超载强度小于这一临界值时不会造成坡顶地基产生破坏。

图 3 和图 4 给出了超载强度 q 依次为 20 kPa、40 kPa、60 kPa、80 kPa 时,抗滑桩加固边坡在桩头自由约束状态下的桩身弯矩和剪力分布。由图 3 可见,随着 q 的增加,桩身的弯矩值逐渐增加;当 q 从 20 kPa 增至 60 kPa 时,桩身最大弯矩值增幅达到 215%。超载强度 q 小于 60 kPa 时,桩身弯矩呈线性变化,而 q 达到 80 kPa 时,桩身弯矩急剧增加,这在一定程度上表明边坡正加速破坏。

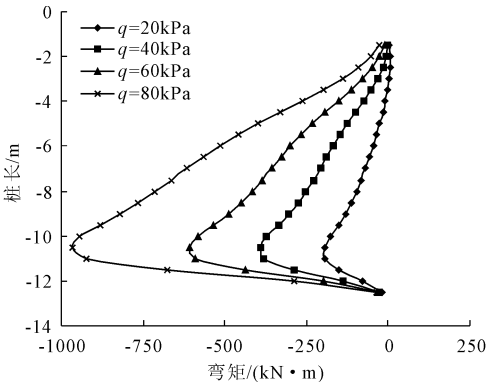


图 3 不同超载强度下桩身弯矩分布

结合图 2 中地基承载力特征值 f_a 与 SRF 的变化曲线与坡顶超载强度对应曲线相交于一点,此处为 $q = 60 \text{ kPa}$ 。这再次表明当 $q \geq 60 \text{ kPa}$ 时,随着土

体强度参数的折减,边坡土体的承载力特征值 $f_a < q$,说明超载作用下边坡的稳定性明显下降。另外,地基土浅部出现塑性变形,竖向位移也急剧增加,土体挤压抗滑桩体,从而加大作用于抗滑桩上的侧向土压力,导致抗滑桩内力骤增。

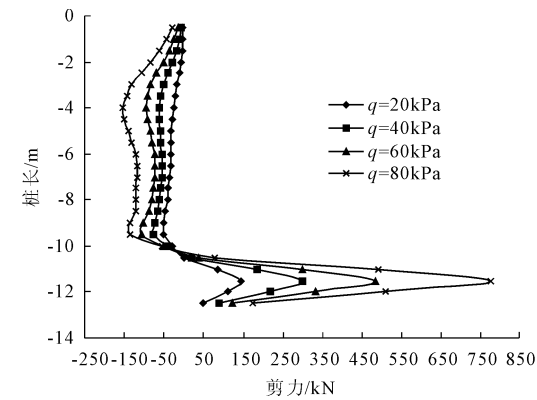


图 4 不同超载强度下桩身剪力分布

2.2 超载位置对抗滑加固效果的影响分析

将坡顶超载视为埋深为零的条形基础。根据《建筑地基基础设计规范》第 5.4.2 条,位于稳定土坡坡顶上的建(构)筑物,当垂直于坡顶边缘线的基础底面边长小于或等于 3 m 时,其基础底面外边缘线至坡顶的水平距离应满足式(4),但不得小于 2.5 m。

$$L_q \geq 3.5B - \frac{d}{\tan\beta}$$

(4)

式中: L_q 为超载外边缘线至坡顶的水平距离, B 为超载垂直于坡顶边缘线方向的宽度, d 为基础埋深, β 为边坡坡角。

为了揭示不同超载位置对边坡加固效果及桩身内力的影响,计算了 L_q 分别为 3.0 m、6.0 m 和 12.0 m 三种工况,并与 $L_q = 0$ m 进行对比,结果发现只有 $L_q = 12.0$ m 时满足上述式(4)的要求。为避开边坡后缘长度对分析结果带来的不利影响,对现行模型稍作修改,令边坡后缘长度 $L_1 = 30.0$ m,开展了不同超载强度 0 kPa、20 kPa、40 kPa、60 kPa、80 kPa 时,其外边缘线至坡顶的水平距离分别为 0 m、3.0 m、6.0 m、12.0 m 工况下的加固边坡 FOS,所得结果绘于图 5。由图 5 可以看出,当 $L_q = 3.0$ m 时,随着超载强度的增加,FOS 近似线性递减,但减小的幅度要小于 $L_q = 0$ m 工况;当 $L_q = 6.0$ m 时,在 $q < 40$ kPa 情况下,超载强度对边坡安全系数基本无影响,但当 $q \geq 40$ kPa 后,超载强度的增加对边坡的安全系数有一定的影响;当 $L_q = 12.0$ m 时,超载强度对边坡安全系数已无影响,这表明超载作用位置已足够远,不再对边坡及抗滑桩产生影响,这同样验证了

公式(4)的合理性。

表 3 不同超载位置下边坡安全系数

参数	超载作用 位距/m	坡顶荷载/kPa				
		0	20	40	60	80
SRF	$L_q = 0$	1.540	1.445	1.354	1.270	1.195
	$L_q = 3.0$	1.540	1.507	1.461	1.396	1.342
	$L_q = 6.0$	1.535	1.535	1.534	1.506	1.460
	$L_q = 12.0$	1.535	1.535	1.535	1.535	1.533

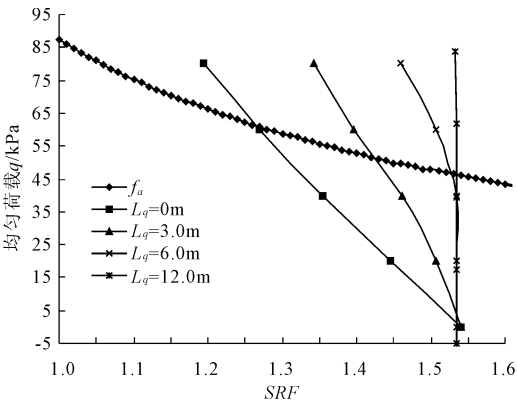


图 5 不同超载位置下边坡安全系数

图 6 给出了不同超载作用位置 ($L_q = 0$ m、3.0 m、6.0 m、12.0 m)、不同超载强度 ($q = 20$ kPa、40 kPa、60 kPa、80 kPa) 条件下桩身弯矩分布情况。分析图 6 可见,随着超载作用位置远离抗滑桩,桩身的弯矩逐渐减小。利用 XTRACT^[16] 截面分析软件,获得桩径 1.0 m、配筋率 1% 条件下的桩身极限弯矩值为 1.132 MN·m,远大于图 6 各工况下的桩身最大弯矩值;即使在最大超载强度条件下(如 $L_q = 0$ m, $q = 80$ kPa),桩身最大弯矩值也小于桩身极限弯矩值。这充分说明坡顶超载环境下的抗滑桩加固边坡,为确保边坡稳定性并减小桩身承受的最大弯矩,超载外边缘至坡顶的水平距离必须满足公式(4)。

图 7 给出了超载强度 $q = 80$ kPa,超载位置 L_q 分别为 0 m、3.0 m、6.0 m、12.0 m 条件下的边坡内部位移云图。分析图 7 可见,随着 L_q 增大,边坡表面的水平位移逐渐减小;当 $L_q = 12.0$ m 时,边坡表面的水平位移已很小,这表明超载对边坡稳定性的影响已趋于消失,此时边坡稳定性已转化为超载下的地基承载力问题。

3 超载作用下桩间土拱效应

图 8~图 11 给出了超载作用位置 L_q 分别为 0 m、3.0 m、6.0 m、12.0 m 时桩顶以下 4 m 位置的截面最大主压应力分布情况,每一种工况下的荷载 q 分别取 20 kPa、40 kPa、60 kPa、80 kPa。

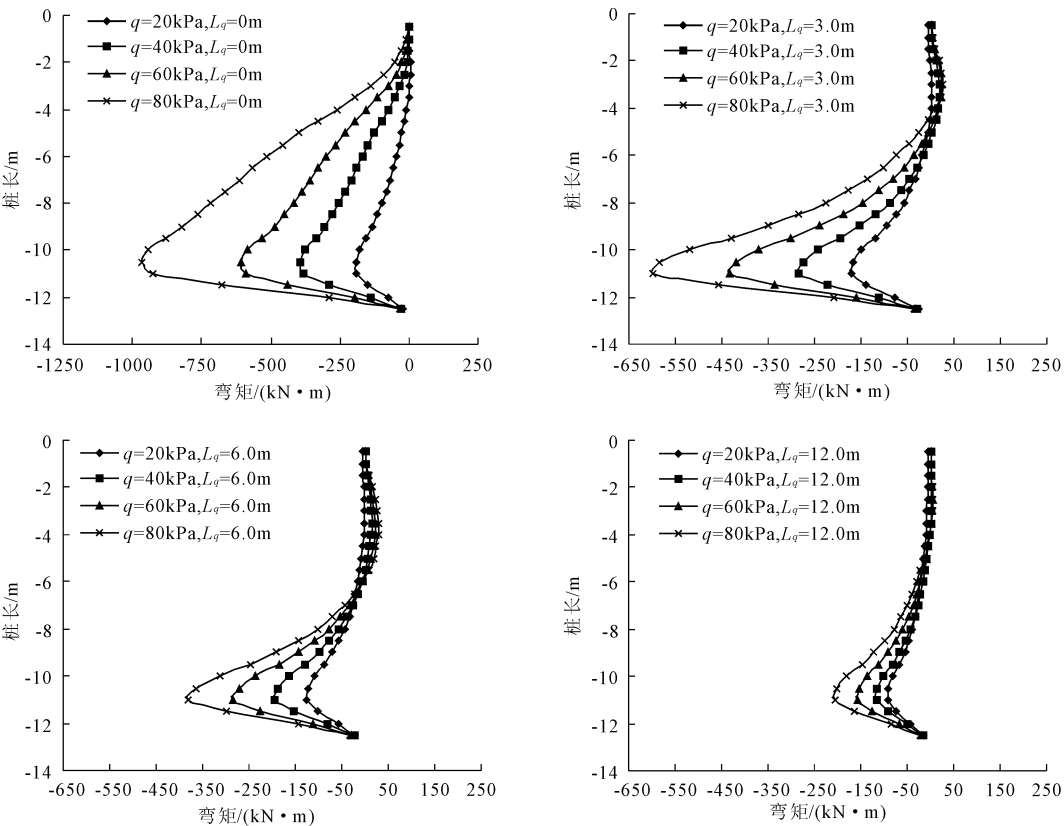


图 6 不同超载位置和强度条件下桩身弯矩分布

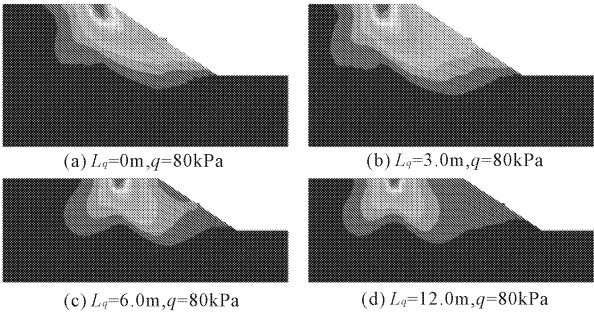


图 7 $q=80\text{ kPa}$ 时不同荷载作用位置下的边坡位移云图

从图 8 可以看出,随着超载强度的增大,桩后的应力集中显著,特别是当超载强度 $q=80\text{ kPa}$ 时,桩后的应力呈现气球状。此外,随着超载强度的逐渐增大,桩间应力土拱的拱高逐渐降低,应力逐渐向桩前推移,这表明在超载强度高于某一值(如 60 kPa)时,抗滑桩间的土拱逐渐失效,抗滑桩的加固功能逐渐减弱。

图 9~图 11 的应力分布云图与图 8 大体相同,不同之处在于随着超载作用位置远离坡顶,抗滑桩后的应力集中程度变弱,桩间应力土拱的拱形向右缓慢迁移。图 11 可以看出,超载强度的大小对桩头以下 4.0 m 深度处的应力拱分布基本无影响,这表明随着超载远离坡顶,其对抗滑桩间的应力拱不再

构成影响,从侧面说明当超载作用位置满足(4)式时,地基极限承载力许可范围内的超载强度对边坡整体稳定性没有影响。

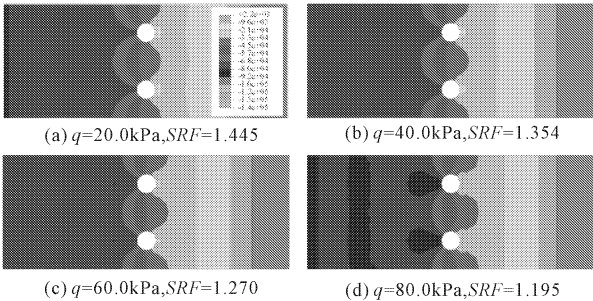


图 8 $L_q=0\text{ m}$ 时不同超载强度下的土拱分布

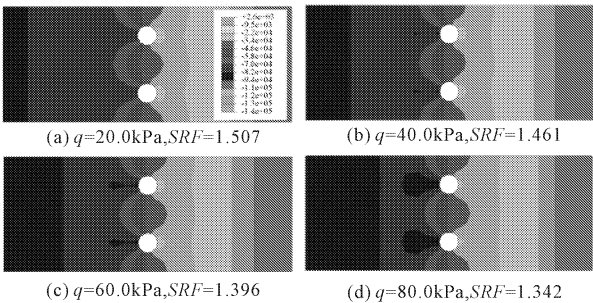


图 9 $L_q=3.0\text{ m}$ 时不同超载强度下的土拱分布

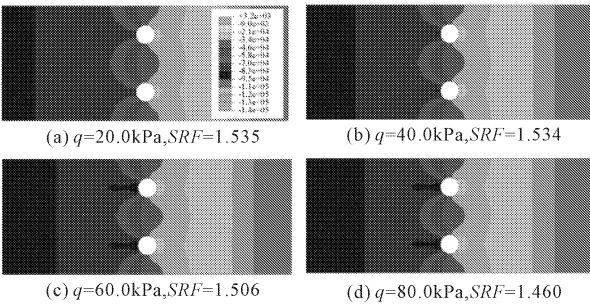


图 10 $L_q = 6.0\text{ m}$ 时不同超载强度下的土拱分布

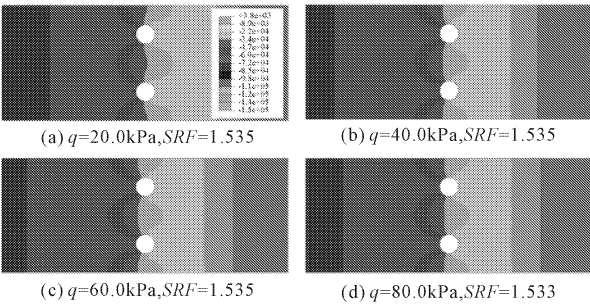


图 11 $L_q = 12.0\text{ m}$ 时不同超载强度下的土拱分布

4 结 语

基于有限元强度折减法,探讨了边坡顶面不同超载强度和超载作用位置条件下抗滑桩加固边坡的整体稳定性和桩身内力分布以及桩间土拱效应。

(1) 坡顶超载大小对抗滑桩加固效果的影响:随着超载强度 q 增加,边坡安全系数 FOS 逐渐减小;当 q 小于地基承载力特征值 f_a 时,边坡破坏模式不显著;随着 q 增加,桩身内力线性增大,当 q 大于 f_a 时,表现为边坡滑动破坏模式,同时抗滑桩内力骤增。算例研究表明,当 q 达到 80 kPa 时,抗滑桩加固的正效应与超载引起的负效应已完全抵消。

(2) 坡顶超载作用位置对抗滑桩加固效果的影响:随着基础底面外边缘线至坡顶水平距离 L_q 的增大,坡顶超载对抗滑桩加固效果的影响逐渐减弱;当 $L_q = 12.0\text{ m}$ (满足公式(3))时,坡顶超载对抗滑桩加固边坡的稳定性已不构成直接影响,表现为地基承载力破坏模式。

(3) 超载作用下抗滑桩间土拱效应:随着坡顶超载强度的逐渐增大或超载作用位置接近坡顶,桩后的应力集中程度逐渐提高,桩间应力土拱的拱高逐渐减小,这表明桩间土拱逐渐趋于失效。

参考文献:

[1] Zienkiewicz O C, Humpheson C, Lewis R W. Associated and non-associated viscoplasticity and plasticity in soil mechanics[J]. Geotechnique, 1975, 25(4): 671-689.

[2] 郑颖人,赵尚毅.有限元强度折减法在土坡与岩坡中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(19): 3381-3388.

[3] Chen L T, Poulos H G. Analysis of pile-soil interaction under lateral loading using infinite and finite elements[J]. Computers and Geotechnics, 1993, 15(4): 189-220.

[4] Nian T K, Chen G Q, Luan M T, et al. Limit analysis of the stability of slopes reinforced with piles against landslide in nonhomogeneous and anisotropic soils [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2008, 45(8): 1092-1103.

[5] Daniel P, Jason G, Annie O L K. Design of drilled shafts to enhance slope stability[C]//Proceedings of the 2010 Earth Retention Conference. American Society of Civil Engineers, 2010: 920-927.

[6] 刘新荣,梁宁慧,黄金国,等.抗滑桩在边坡工程中的研究进展及应用[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2006, 17(1): 56-62.

[7] Liang R, Zeng S. Numerical study of soil arching mechanism in drilled shafts for slope stabilization[J]. Soils and Foundations, 2002, 42(2): 83-92.

[8] Chen C Y, Martin G R. Soil structure interaction for landslide stabilizing piles [J]. Computers and Geotechnics, 2002, 29(5): 363-386.

[9] 吕庆,孙红月,尚岳全.抗滑桩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.

[10] 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, 31(4): 1211-1216.

[11] Liang R Y, Yamin M. Three-dimensional finite element study of arching behavior in slope/drilled shafts system[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2010, 34(11): 1157-1168.

[12] 戴自航,沈蒲生,彭振斌.弹性抗滑桩内力计算新模式及其有限差分解法[J]. 土木工程学报, 2003, 36(4): 99-104.

[13] 年廷凯,鲁志杰,杨庆.坡顶斜向受荷桩工作性能的室内模型试验研究[J]. 土木工程学报, 2010, 43(1): 89-94.

[14] 中华人民共和国建设部. GB50007-2002. 建筑地基基础设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.

[15] Wei W B, Cheng Y M. Strength reduction analysis for slope reinforced with one row of piles [J]. Computers and Geotechnics, 2009, 36(7): 1176-1185.

[16] Imbsen and Associates. Xtract, Ver. 3.0.3[Computer software]. Sacramento, CA.