

双排抗滑桩加固边坡稳定性与荷载传递机制分析

年廷凯¹, 李东晨¹, 徐海洋¹, 李红英²

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

2. 辽宁省水文水资源勘测局, 辽宁 沈阳 110003)

摘要: 为探讨不同双排桩布桩形式下的阴影效应及抗滑桩-边坡体系的稳定性, 考虑三种双排桩布桩形式, 采用基于强度折减的有限元方法开展了桩头自由和固定约束条件下抗滑桩加固边坡的三维数值计算, 获得了抗滑桩-边坡体系整体稳定性安全系数、潜在滑动面以及桩身内力分布情况, 并与单排抗滑桩工况进行了对比研究。在此基础上, 结合三类双排桩在不同深度处的主压应力分布图, 深入探讨了相邻抗滑桩间的土拱效应、后排桩与前排桩间的荷载传递机制。研究表明, 当双排抗滑桩加固潜在滑移坡体时, 不同深度、不同布桩型式下的土拱效应不同, 桩间的土拱在一定程度上反映了双排抗滑桩的作用机制和加固效果。

关键词: 边坡; 双排抗滑桩; 强度折减有限元; 布桩型式; 土拱效应; 安全系数

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2013)04-0124-06

Numerical Analysis on Stability and Load Transfer Mechanism for Slope Stabilization with Double Row Sliding Piles

NIAN Ting-kai¹, LI Dong-chen¹, XU Hai-yang¹, LI Hong-ying²

(1. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, College of Civil and Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China;

2. Liaoning Investigation Bureau of Hydrology and Water Resources, Shenyang, Liaoning 110003, China)

Abstract: To investigate the shadow effect and stability of pile-slope system under different pile arrangement for double row piles, the three cases for the double row piles under free and fixed pile head are respectively considered to calculate the pile's internal forces, critical sliding surface and safety factor for the pile-slope system with the Shear Strength Reduction Finite Element Method (SSR-FEM). Then, the obtained results are compared with those obtained in single row piles. Based on the above analysis, the soil arching effect between the adjacent piles in the same row and the load transfer between the rear and front row of piles for the three cases are thoroughly discussed combined with the principal compression stress distribution at different depth. The results show that when the double row stabilizing piles are inserted in a potential sliding slope, the soil arching effect will be different under the various depth and pile arrangement for double row piles. The soil arching effect can reflect the work performance and reinforcement effect of double row stabilizing piles to a certain extent.

Keywords: slope; double row sliding piles; strength reduction finite element method; pile arrangement; soil arching effect; safety coefficient

0 引言

抗滑桩作为边坡防护与滑坡治理的主要工程措

施之一, 以其诸多的优越性为工程建设所广泛采用。20 世纪 50 年代被应用于宝成铁路沿线滑坡治理中; 60 年代末期至 80 年代, 被应用于成昆铁路等沿

线滑坡治理工程中并取得成功应用;从而初步建立了我国抗滑桩工程的设计理论与计算方法^[1]。经过近30年的发展,抗滑桩加固边坡已经取得了众多的研究成果^[2-7]。随着 Zienkiewicz 等^[8]将强度折减法应用于边坡稳定性分析,许多学者尝试将该方法推广至抗滑桩加固边坡的稳定性分析中。随着现代工程规模的扩大,经过综合考虑,往往需要采取双排或者多排抗滑桩加固滑坡体,如 Ito 等^[9]结合工程实例研究了多排桩加固边坡问题,Chen 等^[10]利用双排桩探究被动桩的荷载传递机理以及土拱效应。

国内一些学者对双排抗滑桩加固边坡展开了系列研究^[11-14]。但目前就抗滑桩工程而言,双排桩的加固设计大多依赖工程经验,没有相应的规范可依,抗滑桩尚未达到最佳的抗滑效果。采用双排抗滑桩加固边坡或滑坡时,后排桩往往会对前排桩产生阴影效应,不同布桩型式下的双排桩,其阴影效应不同。基于此,本文试图探究常规双排桩、等效错列双排桩及等间距错列双排桩三种布桩形式下抗滑桩-边坡体系整体稳定性、临界滑动面以及桩身内力分布情况,并就桩间土拱效应及前后排桩荷载传递机制等进行深入讨论,以期为抗滑桩规范修订和双排抗滑桩设计提供科学依据。

1 分析模型

Kourkoulis 等^[15]定义了等效桩架,即单位边坡宽度上,多排桩的布置形式与单排桩布置时配置桩的数量相同。针对这一理论,本文利用基于强度折减技术的弹塑性有限元方法,对抗滑桩加固三维边坡进行数值分析。

计算模型采用 Wei 等^[4]的典型边坡算例,几何形状如图 1(a),抗滑桩皆选用圆形截面(桩径 1 m),布置形式如图 1(b)。认为工况 1、工况 2 和工况 3 的布桩形式是等效的。工况 1 为单排桩,模型宽度取 W ,桩间距为 S ;工况 2 为常规双排桩,模型宽度取 $2W$,桩间距为 $2S$ 。以上两种情况桩的布置形式是完全等效的。然而,抗滑桩加固边坡,当采用多排桩时,后排抗滑桩会对前排抗滑桩产生阴影效应^[16-17]。所谓阴影效应就是滑动土体产生的推力作用于后排桩身,滑动土体受后排桩的阻扰作用,使得传递到前排桩的推力削弱,使其抗滑效果产生折扣。由于阴影效应的存在,前排的抗滑桩不能充分发挥其抗力,从而在经济上造成不必要的浪费。为削弱阴影效应,充分利用前排桩承载力,本文基于 Kourkoulis 等研究^[15],建立工况 3 的计算模型,采用

等效错列双排桩布置方式,即模型宽度取 $1.5W$,后排桩间距则为 $1.5S$,前排两桩换成中间一根桩。为了充分说明问题并做对比研究,建立工况 4 的等间距错列双排桩,该模型将工况 2 前排两根抗滑桩变换一根。

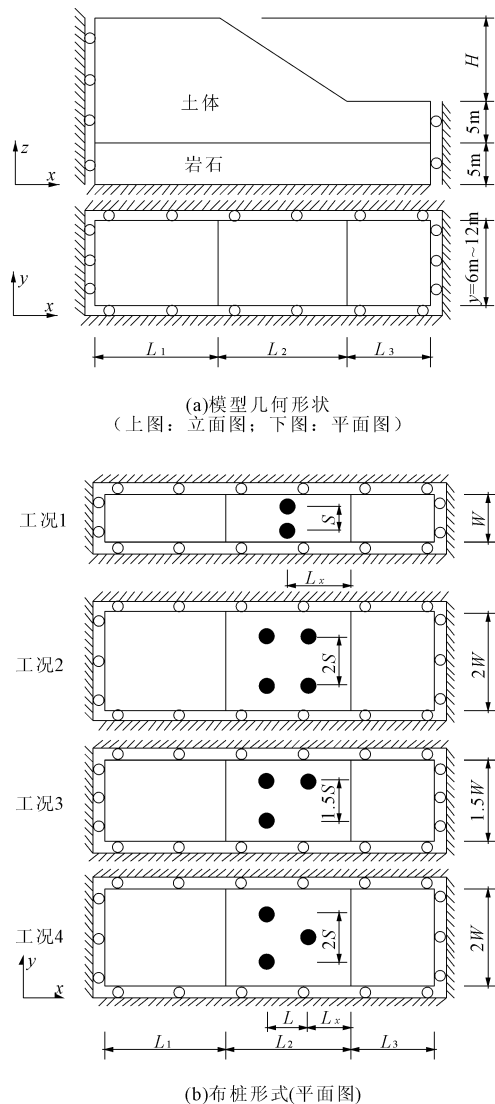


图 1 计算模型

图 1 给出相关模型尺寸与布桩参数如下:边坡坡度为 1:1.5,坡高 $H = 10$ m,坡体水平长度 $L_2 = 15$ m,坡后缘长度 $L_1 = 15$ m,前缘长度 $L_3 = 10$ m,地基深度为 10 m,不稳定土层 $H_u = 15$ m,稳定土层(岩层) $H_s = 5$ m;工况 1 抗滑桩距坡脚的水平距离 $L_x = 7.5$ m,桩形心之间的距离 $S = 3.0$ m, $W = 6.0$ m,桩长为 13.0 m,即桩底嵌入岩层约 2.5 m;工况 2、工况 3 和工况 4 抗滑桩距坡脚的水平距离 $L_x = 5.0$ m,后排桩与前排桩的水平距离 $L = 5.0$ m,后排桩桩长 14.5 m,前排桩长 11.2 m,同样桩底嵌入岩层 2.5 m。抗滑桩、边坡岩土层参数列于表 1。利用有限

元程序 ABAQUS 进行边坡强度折减计算,边坡土体采用服从 Mohr - Coulomb 破坏准则与非关联流动法则的理想弹塑性本构模型。抗滑桩被视为理想线弹性体,桩土间采用接触相互作用,摩擦系数取为 0.3。以数值迭代不收敛并结合坡面特征点位移陡增作为边坡失稳判据。为了减小接触面单元的病态条件,抗滑桩周围土体采用较细的网格形式,土与桩的单元形式皆采用六面体减缩积分 (C3D8R),并对桩周网格进行局部的加密。

表 1 抗滑桩 - 边坡土性参数

材料参数	重度 /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	黏聚力 /kPa	摩擦角 /($^\circ$)	剪胀角 /($^\circ$)	弹性模量 /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

为对比验证本文方法的可行性,取桩和土的弹性模量分别为 60 GPa 和 200 MPa,桩径 $D = 0.8 \text{ m}$,桩间距与桩径之比 $S/D = 3$,其他参数不变,计算获得抗滑桩加固边坡的安全系数为 1.734,与 Wei 等^[4]利用有限差分法所得结果 1.72 相一致,从而验证了上述方法的可行性。

2 结果分析

考虑桩头自由与固定两种约束条件,分别计算了四种布桩工况下抗滑桩 - 边坡体系的安全系数,其结果列于表 2。单从安全系数的角度分析,发现桩头约束条件(自由或固定)对边坡安全系数影响不大。这是因为本例中桩和土的模量相差很大,当土体抗剪强度参数折减到较低数值致边坡发生破坏时,桩头自由和固定约束条件对滑动土体的阻挠效果差别不大造成的。表 2 显示,桩间距为 3.0 m 的单排桩(工况 1)的安全系数最高,桩间距为 6 m(工况 2)与 4.5 m(工况 3)的双排桩次之,而工况 4 的安全系数最小;对比工况 1 与工况 2、工况 3 的安全系数,能够说明阴影效应的存在,如前文所述,三种工况布桩形式(桩间距)是等效的,但是由于后排桩对前排桩的遮挡,使得前排桩不能充分发挥抗滑作用,因而导致工况 2 和工况 3 的安全系数略低于工况 1;通过比较工况 2 与工况 3,能够说明单位宽度上抗滑桩的布置数量相同时,两种双排桩布置形式对安全系数影响不大;同样,通过比较工况 2 与工况 4,两者抗滑桩的等效加固宽度分别为 $1/2W = 3.0 \text{ m}$ 、 $2/3W = 4.0 \text{ m}$,能够说明阴影效应没有等效宽度对安全系数的影响大,亦是工况 4 安全系数相对较小的原因。

表 2 单桩与等效桩架加固边坡的安全系数

工况	桩头自由				桩头固定			
	1	2	3	4	1	2	3	4
FOS	1.540	1.502	1.508	1.428	1.537	1.502	1.505	1.426

图 2 给出了单排桩及三种双排桩布桩工况下的桩身弯矩和剪力图。以后排桩桩头为基准零点,绘制了桩头自由与固定两种约束条件下,计算不收敛时的桩身弯矩图和剪力图;由剪力图也间接反映了作用于桩身的侧向土压力。

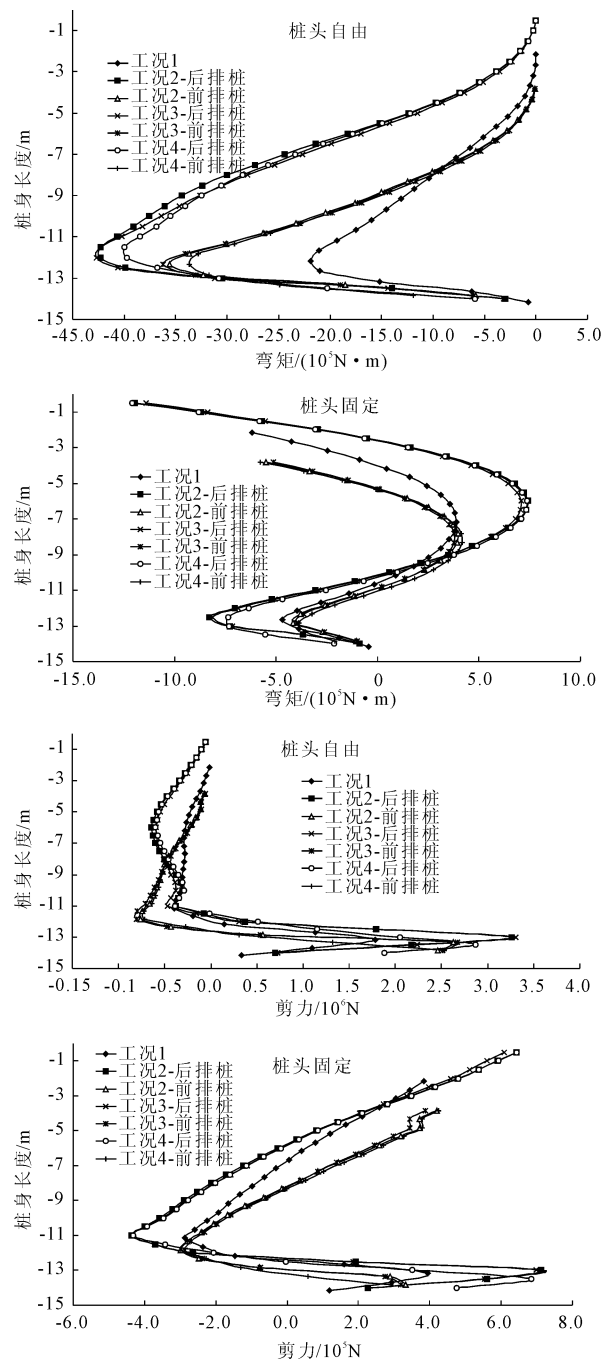


图 2 桩头自由与固定时的桩身内力分布

图 2 的桩身弯矩分布图显示,工况 1 的桩身最大弯矩值约为工况 2 和工况 3 后排桩的 50%,并且与工况 2 和工况 3 的前排桩相当。这是因为抗滑桩等效宽度相同条件下,工况 2 和工况 3 后排桩间距为工况 1 的 2 倍,滑坡推力也应为其 2 倍;因此桩间距增大的同时,桩身分担的内力成比例增大,所得数据证实了这一点。

分析桩身弯矩分布图,桩头自由时,工况 2 和工况 3 前排桩的桩身弯矩最大值相比后排减少约 15%,而桩头固定后这一数据变为 45%,可见阴影效应在抗滑桩头约束的情况下较明显。这是因为桩头自由时,桩在滑坡推力下会产生位移,进而加大桩身两侧的土体向下滑动的趋势,由于两种情况下后排桩的桩间距分别为 6 m 和 4.5 m,桩后的土体向下滑动,从后排桩侧绕流而作用于前排桩;桩头固定时,土体从后排桩绕流的范围将减小,一定程度上使得前排桩身的受力减小。

图 2 也显示,桩头固定时桩身最大弯矩幅值约为桩头自由时的 20%,这说明桩头固定使桩身的弯矩大幅减低,这是因为桩头以及土层与岩层交界处的桩体位移受到较大的限制,使桩近似成为两端固定承受侧向土压力的梁,产生的弯矩沿桩身的分布较协调。利用 XTRACT^[18] 截面分析软件,计算不同配筋率下单根抗滑桩的极限弯矩值,其结果列于表 3。可见桩头固定时,桩身配筋率在 1% 左右就可以满足要求;桩头自由情况下,工况 2、工况 3 与工况 4 的后排桩身配筋率即使为 4% 也不能满足设计要求。配筋的大幅增加会直接影响工程造价,因此在实际工程中,应当尽量给桩头施加约束,以减少其自由度。固定桩头会在一定程度上提高工程造价,也要综合考虑成本因素采取相应措施。

表 3 不同配筋率下桩身极限弯矩值

桩径 /m	截面面积 /m ²	配筋率 /%	极限弯矩 /(10^6 N·m)
1.0	0.785	1	1.132
		2	2.100
		3	2.990
		4	3.901

注:混凝土强度取 C30,钢筋取 HRB400。

图 3 给出了 4 种工况下,抗滑桩桩头在自由与固定约束模式下的变形图。从图 3 中可以看到,无论哪一种约束模式,桩底至上 2.5 m 部分基本没有变形,这是由于该部分桩身嵌于较为坚硬的岩层,即

桩底以上 2.5 m 部分相当于固定端;桩头自由时,由于抗滑桩受前后不等的侧压力作用,桩身近似为一受分布荷载的悬臂梁,桩身最大位移出现在桩头;而桩头固定时,桩身受力近似为一受分布荷载作用的固支梁,因此桩身最大变形出现在中上部。观察两种约束条件下后三种布桩工况的桩身变形,不难发现前排桩变形相对后排桩的小很多,这是因为后排桩对前排桩的阴影效应,使得前排桩身所受侧向土压力较小。

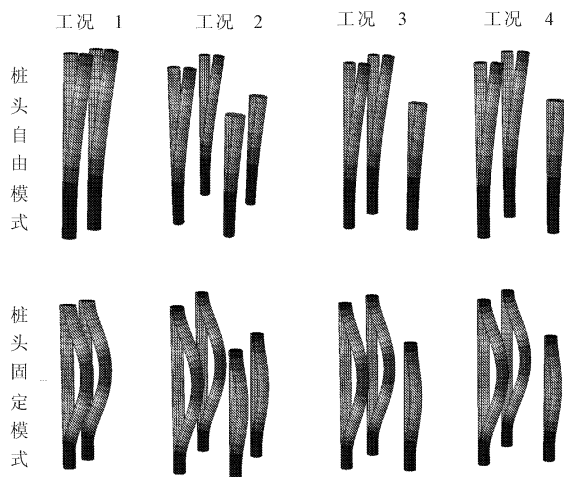


图 3 桩头自由与固定约束条件下四种工况桩身变形图

图 4 给出了 4 种工况下,桩头自由与固定约束条件下边坡塑性应变云图(两桩中间断面)。从图 4 中可以看到,工况 1(单排桩模式)的塑性应变剪切带被切割成前后两个部分,这与 Wei 等(2009)^[1] 的研究结论一致,即当抗滑桩间距(工况 1 桩间距 $S = 3.0$ m)较小时,两桩中间的潜在滑移面被分成前后两部分,这反映了抗滑桩侧向加固范围已到达两桩中间断面,此种工况下桩头固定时潜在滑动面深度比桩头自由时浅(对比图 4 工况 1)。其余三种工况下(等效双排布桩模式)两桩中间断面的塑性应变剪切带分布较为一致,潜在滑移面为一光滑连续曲面,表明抗滑桩加固范围没有到达中间断面,土体从桩侧绕流滑动,这种情况下不能充分地发挥群桩作用。此时,桩头固定与自由的潜在滑动面深度差别不大。

3 不同双排布桩形式下的土拱效应

图 5、图 6 与图 7 依次给出了工况 2、工况 3 与工况 4 不同深度处的最大主压应力平面图(图中深度以后排桩为基准)。

图 5 为桩间距为 6.0 m 的常规双排桩设计方案 (工况 2), 桩头以下 0~10.0 m, 显示后排桩的土拱应力云图。对于后排桩而言, 桩头以下 6.0 m 处的应力趋于平稳; 可见, 边坡失稳破坏时滑裂面深度位于桩头以下 5.0 m~6.0 m。通过观察桩头以下 4.0 m~10.0 m 的最大主应力形式, 前排桩的土拱拱高相对较低, 结合前文桩身的内力分布情况, 进一步说明了后排桩对前排桩的阴影效应。

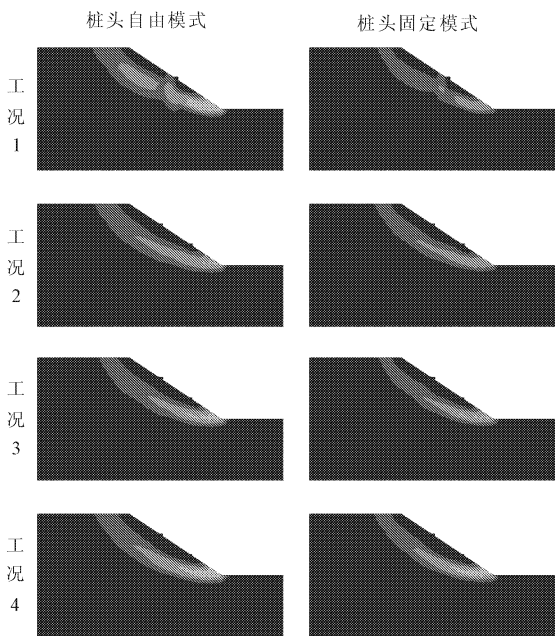


图 4 桩头自由与固定时四种工况下桩断面塑性应变

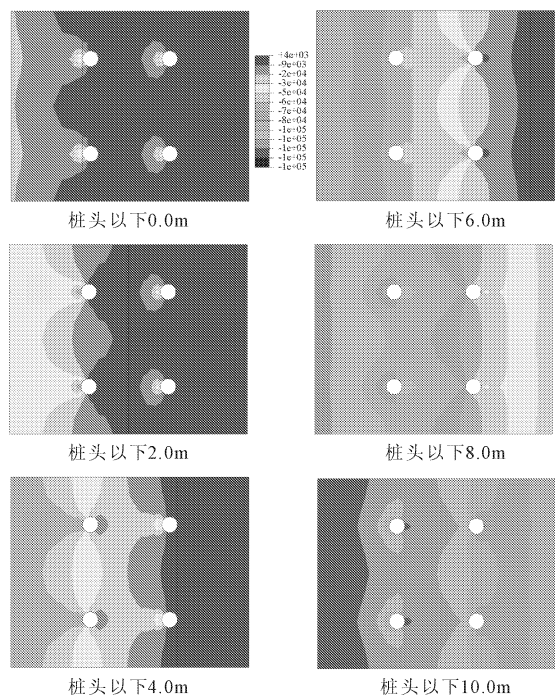


图 5 常规双排布桩模式下不同深度处的土拱分布

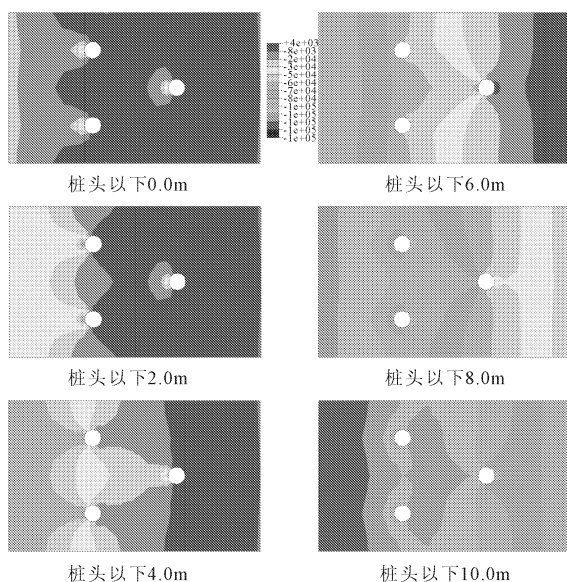


图 6 等效错列布桩模式下的土拱分布

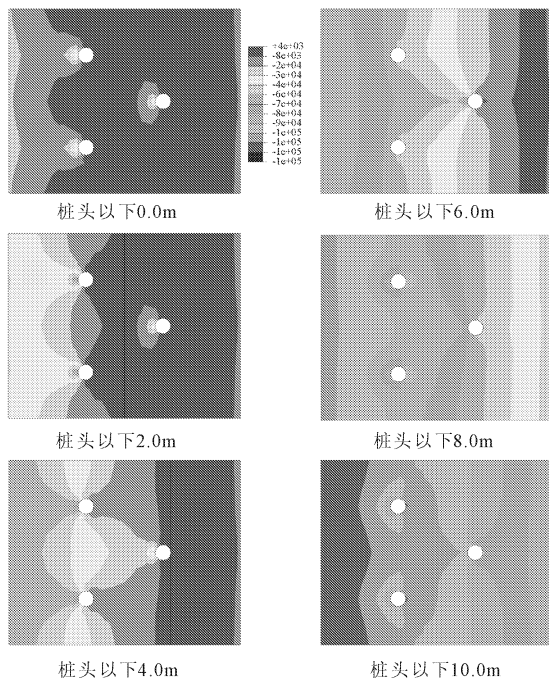


图 7 等间距错列布桩下的土拱分布

图 6 显示等效错列布桩工况 (工况 3), 与图 5 布桩间距是等效的, 即单位宽度上布桩数量相同; 图 7 显示等间距错列布桩工况 (工况 4), 与图 5 后排桩的布置间距相同。对比 3 种工况, 发现它们后排桩的应力云图基本相似; 结合前文的桩身内力图 (图 2), 对比图 5 和图 6 不难发现, 尽管后排桩对前排桩存在阴影效应, 但是两排按等效间距布置的桩内力分配比较均匀, 这一定程度上说明图 5 (工况 2 桩间距为 6.0 m) 的后排桩拱效应相对薄弱, 将桩后的较多推力传递到前排桩, 而对图 6 (工况 3 错列布置

桩,后排间距为 4.5 m)的拱效应则发挥较好,使得较多推力作用于后排桩,因此才有图 2 两种工况下桩内力基本相同。对于图 7(工况 4 等间距错列布桩,后排间距为 6.0 m),其安全系数仅为 1.426,说明该情况下的土拱效应更加薄弱。

4 结 论

通过采用弹塑性有限元强度折减方法,获得了三种不同双排桩布桩形式下的边坡安全系数、桩身内力分布及桩间土拱效应,得出如下具体结论:

(1) 对于探讨的三种双排桩布置形式,由于阴影效应的存在,导致后排桩的内力高于前排桩,也造成双排桩加固边坡的整体安全系数低于等效桩间距下的单排桩。

(2) 对比分析三种双排桩布桩形式,等间距错列布桩(工况 4)加固效果最弱,常规双排桩(工况 2)、等效错列双排桩(工况 3)加固效果和桩身内力基本一致。

(3) 当双排桩加固潜在滑坡坡体时,不同布桩形式、不同深度处土拱效应不同,桩间土拱在一定程度上反映了双排抗滑桩的作用机制和加固效果。

参考文献:

[1] 铁道部第二勘测设计院. 抗滑桩设计与计算[M]. 北京:中国铁道出版社,1983:1-146.

[2] 年廷凯. 桩-土-边坡相互作用数值分析及阻滑桩简化设计方法研究[D]. 大连:大连理工大学,2005:41-55.

[3] 周德培,肖世国,夏雄. 边坡工程中抗滑桩合理桩间距的探讨[J]. 岩土工程学报,2004,26(1):132-135.

[4] 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.

[5] 高长胜,陈生水,杨守华,等. 基于强度折减有限单元法的抗滑桩加固边坡特性分析[J]. 水利与建筑工程学报,2010,8(4):119-122.

[6] Kourkoulis R, Gelagoti F, Anastasopoulos I, et al. Hybrid method for analysis and design of slope stabilizing piles[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2012,138(1):1-14.

[7] 年廷凯,徐海洋,刘红帅. 抗滑桩加固边坡三维数值分析中的几个问题[J]. 岩土力学,2012,33(8):2521-2526.

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

[9] Ito T, Matsui T, Hong W P. Extended design method for multi-row stabilizing piles against landslide[J]. Soils and Foundations, 1982,22(1):1-13.

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

[11] 吴昌将,张子新. 边坡工程中抗滑桩群桩土拱效应的数值分析[J]. 地下空间与工程学报,2007,3(Z1):1305-1309.

[12] 申永江,吕庆,尚岳全. 桩排距对双排抗滑桩内力的影响[J]. 岩土工程学报,2008,30(7):1033-1037.

[13] 唐芬,郑颖人,杨波. 双排抗滑桩的推力分担及优化设计[J]. 岩石力学与工程学报,2010,29(S1):3162-3168.

[14] 杨波,郑颖人,赵尚毅,等. 双排抗滑桩在三种典型滑坡的计算与受力规律分析[J]. 岩土力学,2010,31(Z1):237-244.

[15] Kourkoulis R, Gelagoti F, Anastasopoulos I, et al. Slope stabilizing piles and pile-groups: parametric study and design insights[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2011,137(7):663-677.

[16] Poulos H G, Davis E H. Pile Foundation Analysis and Design[M]. New York:John Wiley & Sons, 1980.

[17] Reese L C, Wang S T, Fouse J L. Use of drilled shafts in stabilizing a slope[C]//Stability and Performance of Slopes and Embankments, 1992,2:1318-1332.

[18] XTRACT, Ver. 3.0.3 [Computer software]. Imbsen and Associates, Sacramento, CA.