

文章编号: 1673-9469 (2018) 04-0044-07

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2018.04.010

群桩条件下刚性桩加固斜坡软弱地基路堤稳定性分析

孙永恒^{1, 2}, 马露^{1, 2, 3}

(1. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏南京 210098; 2. 河海大学江苏省岩土工程技术工程研究中心, 江苏南京 210098; 3. 安徽科技学院建筑学院, 安徽蚌埠 233100)

摘要: 针对刚性群桩加固斜坡软弱地基路堤的应用还不充分问题。通过有限元软件 ABAQUS 建立刚性群桩加固斜坡软弱地基路堤的三维数值分析模型, 对比分析了刚性桩桩距、桩身弹性模量等设计参数对桩内力、变形的影响及其对路堤加固效果的影响。研究表明: 经刚性群桩加固后, 斜坡软弱地基的整体稳定性得到显著提高; 与无桩加固相比, 路堤最大沉降值减小约 1.5 ~ 1.93 倍, 地基的侧向变形值减小约 1.46 ~ 2 倍; 随着刚性桩弹性模量、嵌固深度增加, 刚性桩的受力状态影响不大, 刚性桩最大竖向应力和最大桩身土压力的变化幅度均小于 10%; 桩距对刚性桩的受力状态、水平位移影响较为显著; 对比分析桩距和桩弹性模量对路堤沉降值的影响, 研究发现桩距是影响路堤沉降的主要因素。因此综合考虑路堤稳定性、桩身受力以及工程的经济性, 本工程刚性群桩桩距选择为 2 m, 弹性模量选择为 10 GPa。

关键词: 道路工程; 斜坡软弱地基; 路堤; 刚性群桩; ABAQUS

中图分类号: TU751.4

文献标识码: A

Stability of embankment on sloped weak ground reinforced by rigid group piles

SUN Yongheng^{1, 2}, MA Lu^{1, 2, 3}

(1.Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2.Jiangsu Research Center for Geotechnical Engineering Technology, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Anhui Science and Technology University, Bengbu, Anhui 233100, China)

Abstract: Anti-slide pile has been used widely in constructing embankments on sloped weak ground, but the application of rigid group piles to strengthen embankments on sloped weak ground is still insufficient. Based on the numerical simulation, a comprehensive investigation on the sloped weak ground reinforced by rigid piles was conducted by using software ABAQUS. The paper studies the influence of piles design parameters such as pile spacing, elastic modulus on its internal forces and deformation. Compared with the reinforcement without piles, the maximum settlement value of the embankment decreased by 1.5-1.93 times, and the lateral deformation value of the foundation decreased by 1.46-2 times. With the increase of the elastic modulus of rigid piles and embedded depth, the stress state of rigid piles does not significantly increase. The impact of pile spacing on rigid piles is significant. With the increase of elastic modulus and pile spacing, the reinforcement effect is improved in some extent. It is found the pile spacing is more effective to reduce the pavement settlement value of the embankment compared with the elastic modulus. Under the consideration of the factors such as the stability of embankment, force, economy etc, the pile group spacing of rigid pile group is 2 m, and the elastic modulus is 10GPa in this project.

Key words: highway engineering; sloped weak ground; embankment; rigid pile; ABAQUS

收稿日期: 2018-08-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41772311); 浙江省自然科学基金资助项目(LY17E080016); 安徽省高等教育振兴计划项目(2015ZYTZ044)

作者简介: 孙永恒(1994-), 男, 江苏淮安人, 硕士研究生, 主要从事软基处理研究工作。

在我国云贵地区，地势崎岖不平，道路建设不可避免要穿过斜坡软弱地基，如渝怀铁路是典型的斜坡软土地基等^[1-4]。研究^[5-8]发现：打入桩可以有效控制地基软弱层的沉降，而采用抗滑桩可以大幅减小路基整体的侧向变形。由上所述，对于斜坡软弱地基，主要通过增强地基土体强度以及防止路基土体滑动来提高斜坡软弱地基路堤的稳定性。

已有的斜坡软弱地基的研究重点关注下部地基的稳定性方面，而对上部路堤的变形及稳定性研究严重不足，易导致在某些工况下下部地基是稳定的，但上部路堤的沉降变形已超过规范要求。以国道 108 线广元段填方路基沉降这一病害处治为例，可见路堤表面不均匀沉降这一病害不容忽视。因此，本文的研究重点是在不同的群桩设计参数下研究刚性桩内力、位移以及上部路堤的变形和稳定性。

1 数值模型介绍及结果分析

1.1 土工离心模型试验

魏永幸等^[3]、张良等^[8]就渝怀铁路路堤施工过程中遇到的工程问题，建立了室内土工离心模型试验，进行了斜坡软弱地基路堤加固方案的研究。图 1 是单线铁路斜坡软弱地基路堤的断面图，地面横坡为 1:10，路堤顶面宽为 7.5 m，路堤中心线填高为 7.88 m，路堤边坡比为 1:1.5，软弱土层的厚度为 6 m。模型率 $N=80$ 。抗滑桩横截面直径尺寸为 1.142 m，桩长为 12 m，抗滑桩的尺寸与布置间距由原型按模型率进行换算。

1.2 数值分析与离心模型试验结果对比

为校核所建立的数值分析模型的可靠性，图 2 给出了模型与土工离心模型所获得的路堤荷载作用范围内斜坡软弱地基区域位移等值线图，各图取软弱层断面。

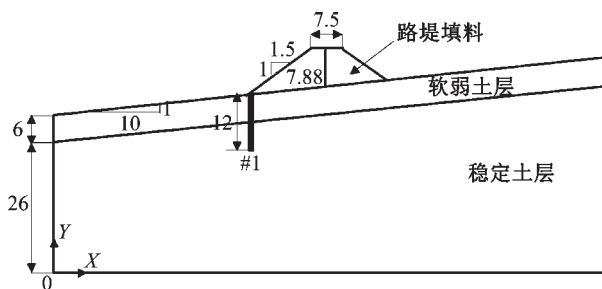
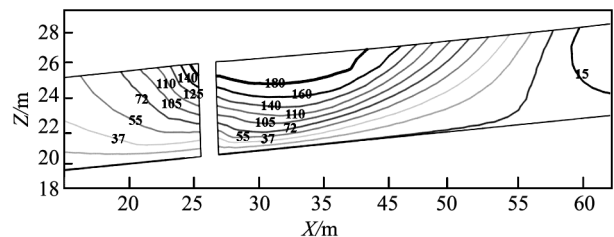


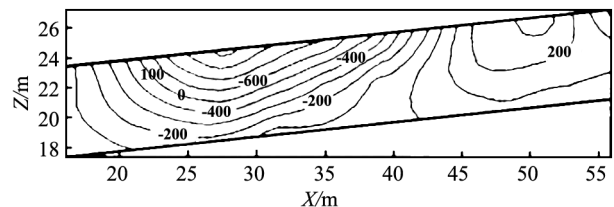
图 1 试验原型断面图 (单位: m)

Fig.1 Cross section of prototype for test(unit: m)

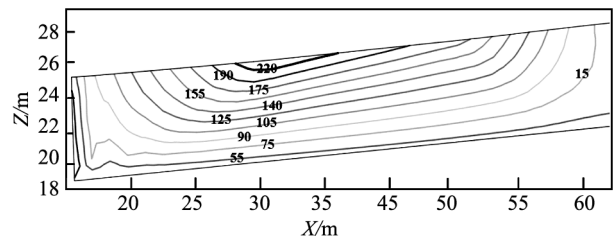
分析图 2 可发现，ABAQUS 模型与土工离心模型所获得的斜坡软弱地基软弱层位移场变化大致相似，其中抗滑桩加固计算软弱层最大水平位移和最大竖向位移之比为 0.818，抗滑桩加固试验软弱层最大水平位移和最大竖向位移之比为 1.5。这两者相差不是很大，可以说明基于渝怀铁路所建立的抗滑桩加固斜坡软弱地基路堤模型的建模方法是正确合理的。其中二者位移存在的差异，可能是由于：限于试验条件，土工离心模型试验未能模拟路堤的分层分步建造，压实度不够，所以试验结果偏大；离心模型试验本身固有的误差^[9-10](如科氏加速度、离心机启动制动等)；但总的来说，两者趋势一致，所以本文建立的 ABAQUS 数值分析模型可以满足工程分析的要求。



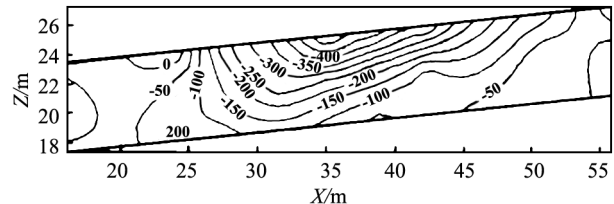
(a) 抗滑桩加固计算软弱层水平位移



(b) 抗滑桩加固试验软弱层水平位移



(c) 抗滑桩加固计算软弱层竖向位移



(d) 抗滑桩加固试验软弱层竖向位移

图 2 ABAQUS 模型与土工离心模型位移等值线图 (单位: mm)

Fig.2 Displacement contours of ABAQUS model and geotechnical centrifugal model(unit: mm)

1.3 刚性桩加固斜坡软弱地基路基模型

为了对群桩条件下斜坡软弱地基路堤刚性群桩加固参数进行研究,本文基于渝怀铁路实例^[1-4],采用大型有限元软件 ABAQUS 6.12 建立群桩加固斜坡软弱地基路堤的数值分析模型。图 3 是有限元模型网格划分图,从中可以看出 10 根刚性桩的布桩位置。其中模型的几何尺寸、形状严格按照渝怀铁路工程原型尺寸进行建立,并在其基础上首次对群桩加固斜坡软弱地基路基进行数值分析。模型的左右两边侧向边界限制水平方向位移,模型底面限制竖向及水平方向位移。本文中土体本构采用摩尔库伦模型^[2],模型单元选择为 C3D8。桩-土相互作用按照库伦摩擦接触考虑,在 ABAQUS 中选取为面面接触,法向为硬接触,切向为罚摩擦,桩与土的摩擦系数为 0.55。土层强度参数根据该工程的地勘报告确定,土体强度参数如表 1 所示。

2 刚性群桩条件下各桩的受力状态的分析

基于图 3 建立三维分析模型,其中 $l=2\text{ m}$, $E=7\text{ GPa}$,分析了路堤下不同位置桩轴力和桩身土压力特性,目的是研究路堤下不同位置桩的抗滑移机理。图 4(c) 反映了各桩的轴力、桩身土压力,可以看出,不同位置桩轴力均随桩深度增加而增大。坡肩至坡脚范围内的桩,其轴力随桩距路堤中心距

离增大而减小, #4—#6 桩轴力最大,坡脚处 #1, #3, #9 桩的轴力最小,这意味着路堤中心线附近的桩(#4—#6) 承受绝大部分上部路堤荷载,说明坡顶范围内桩的竖向承载力对维持路堤稳定有重要的作用。同时,路堤填土由土体自重有向两侧滑动的趋势,由此路堤中心线两侧的桩均受到方向相反的侧向荷载,从图 4(d) 刚性桩的水平位移更好地验证了这一现象(#1—#4 桩水平位移为负值, #6—#10 桩水平位移为正值)。从图 4 可看出,各桩在路堤滑裂面的位置产生了桩身土压力最大值,这是由于嵌固在下卧层的桩类似于悬臂梁,软弱层土向两侧滑动,致使下卧层上表面(软弱层下表面)桩身土压力取得最大值。由图 4(a)、(b) 还可以看出,桩身土压力随桩距路堤中心距离增大而减小,其中 #1—#3 桩, #8—#10 桩身土压力最大, #4—#6 桩身土压力较小。从图 4(d) 还可以看出,各桩水平位移随桩距路堤中心距离增大而增大, #1—#7 桩水平位移为正, #1 桩水平位移最大, #8—#10 桩水平位移为负, #10 桩水平位移最大,从桩顶的水平位移也很好的解释了 #1—#5 桩顶桩身土压力为正值, #8—#10 桩顶桩身土压力为负值;同时可得各工况距路堤中心较远的桩的阻滑作用比较大。

因此,下面对刚性桩设计参数敏感性分析,均取各工况最不利情况,即桩身土压力对 #1 桩进行研究,桩竖向应力对 #5 桩进行研究。

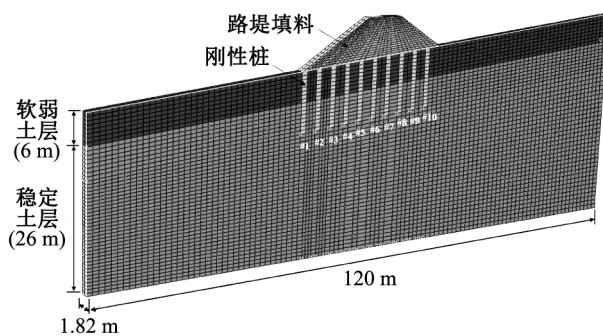


图 3 有限元模型

Fig.3 Finite element model

表 1 土体材料参数
Tab.1 soil parameters

材料	重度 γ /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\phi/^\circ$	弹性模量 E/MPa	泊松比 ν
路堤填料	19	25	25	30	0.35
软弱土层	18	10	10	5	0.40
稳定土层	22	200	50	300	0.25

3 影响因素分析

为了更充分地研究群桩加固斜坡软弱地基下最危险处刚性桩及路堤的工作形状,进行了多组影响因素分析。分别分析了桩距、嵌固深度及桩弹性模量的变化对受力最危险处刚性桩的轴力及桩身土压力的影响。同时,还定性分析了桩距、桩弹性模量的变化对路堤整体稳定性的敏感性影响。

3.1 桩距对桩受力状态的影响

建立工况一三组计算模型,分别取 3 组计算模型中刚性群桩中最危险处刚性桩,并获得沿其桩身深度方向的桩身土压力(即 x 向,余下同)和桩竖向应力(即 y 向,余下同)变化曲线。

由图 5 可知,随着桩距的增大,刚性桩桩身所承受的桩身土压力、竖向应力、水平位移均逐渐增大,但增大的趋势略有所缓和,这意味着更多的侧向荷

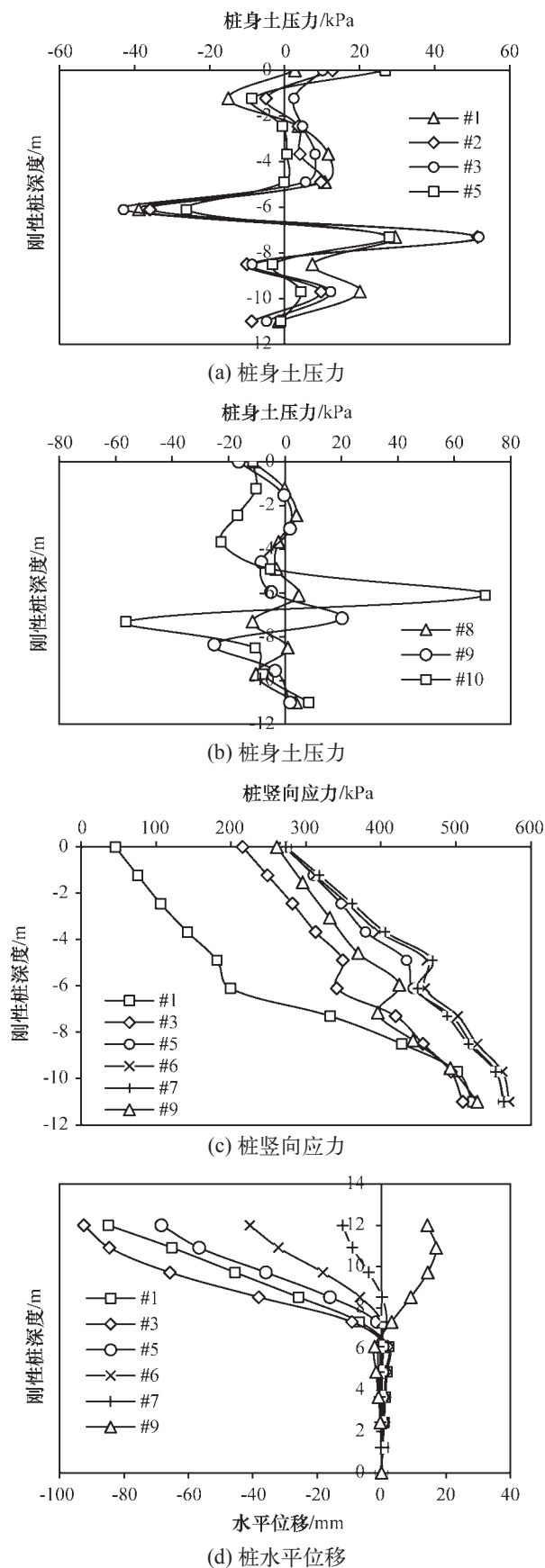


图 4 群桩加固下各桩受力状态和水平位移
Fig.4 The stress state and horizontal displacement of each pile under group pile reinforcement

表 2 影响因素分析模拟工况

Tab.2 Summary of analyses presented in parametric study

影响因素	桩间距 <i>l</i> /m	桩嵌固深度 <i>h</i> /m	桩的弹性模量 <i>E</i> /GPa
工况一	2.0	6.0	7.0(标准组)
	3.0	6.0	7.0
	4.0	6.0	7.0
工况二	2.0	2.0	7.0
	2.0	3.0	7.0
	2.0	5.0	7.0
工况三	2.0	6.0	7.0(标准组)
	2.0	6.0	5.0
	2.0	6.0	7.0(标准组)
	2.0	6.0	10.0
	2.0	6.0	20.0
	2.0	6.0	20.0

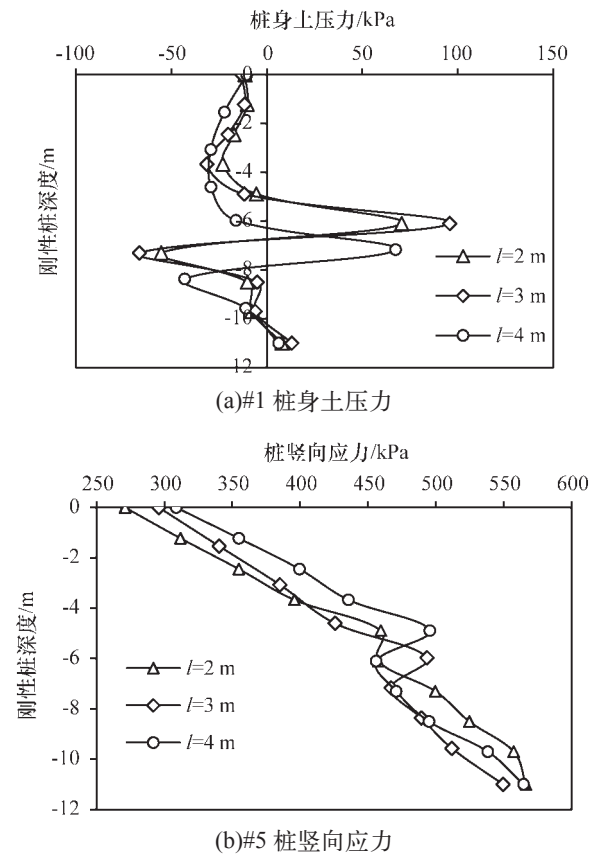


图 5 桩距对桩受力状态的影响

Fig.5 The influence of pile spacing on the stress state of piles
载被转移到刚性桩桩身，故提高刚性桩弹性模量方可降低工程风险。在实际工程中，应选择合理的桩距，使得桩身处于最佳应力状态。同时，在设计过程中还应考虑经济及施工等各项因素。结合图 5 可以看出，桩身土压力以及桩轴力最大值均出现下卧层的上表面，即滑裂面上。

3.2 嵌固深度对桩受力状态的影响

建立工况二 4 种工况计算模型, 分别获得沿 #1 桩深度方向桩身土压力和 #5 桩竖向应力变化曲线 (如图 6)。由图 6 可知, 随着桩嵌固深度的增加, 桩身土压力和桩竖向应力均相差不大, 可见在满足规范要求的前提下, 桩嵌固深度对桩受力状态的影响较小, 因此, 在设计时根据文献^[11]中规范要求, 确定合理的桩嵌固深度即可。

3.3 桩身弹性模量对桩受力状态及水平位移的影响

建立工况三桩 4 种计算模型, 分别获得沿刚性桩深度方向桩身土压力、桩竖向应力及水平位移变化曲线 (图 7)。由图可知, 随着桩身弹性模量的增加, 桩身所承受的土压力逐渐增大, 桩身位移逐渐减小, 桩竖向应力几乎没有变化, 因此, 提高刚性桩的弹性模量对刚性桩受力状态和变形有一定的影响, 本工程中选择弹性模量 $E_p=7$ GPa 的刚性桩, 既满足工程安全需要, 又增加了经济效益。

3.4 桩间距、桩弹性模量对路堤加固效果的影响

为了满足公路、铁路的使用要求, 路面沉降需满足《土方路基验收标准》中的对路面平整度的要求, 即高速公路、一级公路平整度小于 15 mm, 横坡小于 2%, 因此本文综合考虑路面沉降值和安全系数, 以研究桩间距、桩弹性模量对路堤加固效果的影响。分别建立工况一 4 种工况的计算模型, 工况三 4 种工况的计算模型, 取各种工况的路面沉降值。由图

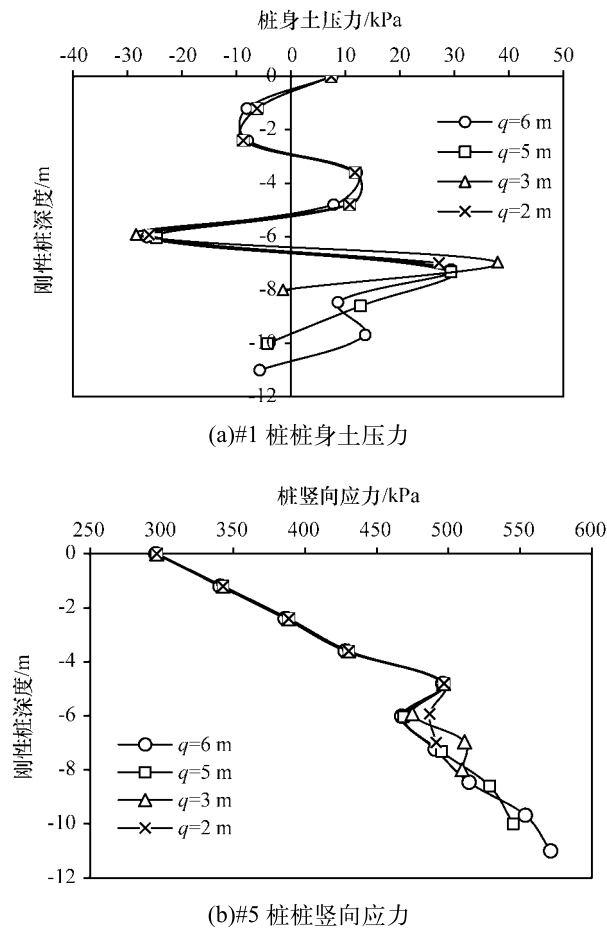


图 6 嵌固深度对桩受力状态的影响
Fig.6 The influence of embedded depth on the stress state of piles

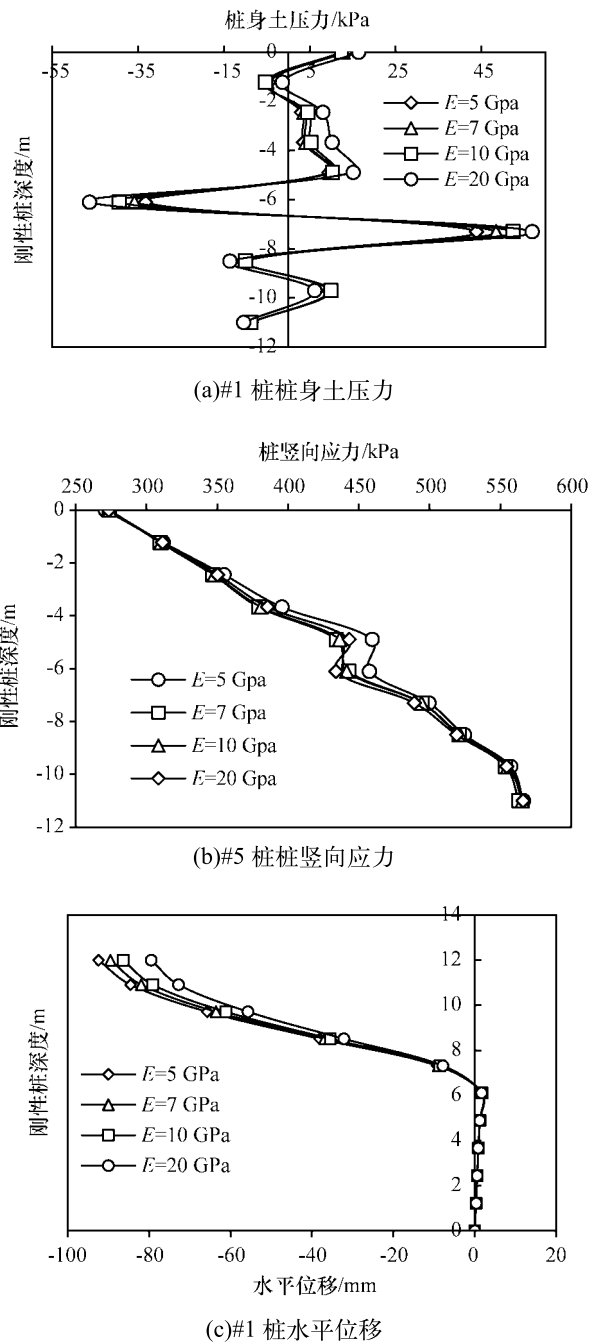
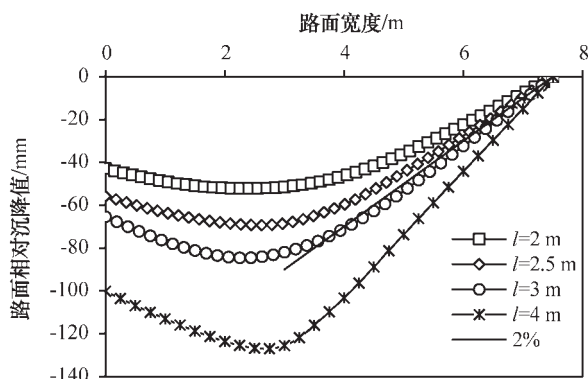


图 7 桩弹性模量对桩受力状态和水平位移的影响
Fig.7 The influence of elastic modulus on the stress state of piles and horizontal displacement

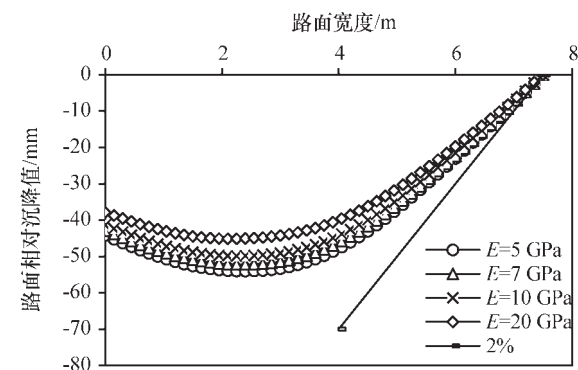
8(a)可知,保持其他参数不变,随着桩距的逐渐增大,路面的沉降不断增大,增大的效果比较显著(l 增加50%,路面沉降最大值增大约51%)。由图8(b)可得,保持其他参数不变,随着桩弹性模量的增加,路面沉降值逐渐增大,但增大的效果不明显(E 增加50%,路面沉降最大值减小约26%)。

随着桩间距的增加,安全系数急剧减小,在桩间距较小时(如 $l=2\sim 2.5$ m),安全系数趋近最大值,这种现象表明桩间距在2~2.5 m时,对路堤的加固效果贡献最大。随着桩弹性模量的增加,安全系数先急剧增加后缓慢增加,在桩弹性模量较大时(如 $E=10\sim 20$ Gpa),安全系数趋近最大值,这种现象表明桩弹性模量在10~20 Gpa时,对路堤的加固效果最佳。

图9为桩弹性模量和桩距对安全系数影响的规律,经对比分析发现, l 增加50%,安全系数减小约11%,而 E 增加50%,安全系数增大仅约7%,故选择合理的桩距对路堤的加固显得至关重要。因此,在综合考虑安全和经济的情况下,本工程刚性群桩桩距选择为2.5 m,弹性模量选择为10 GPa。



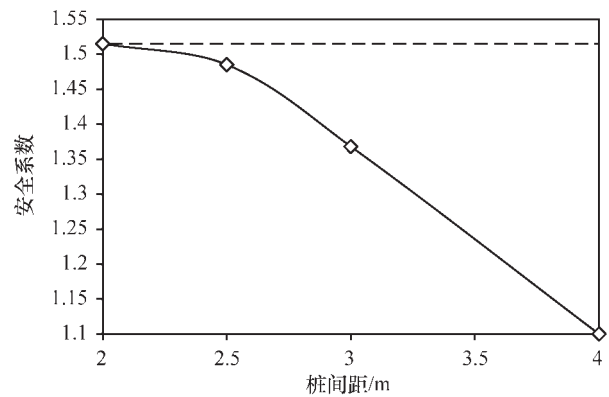
(a) 桩弹性模量 10 GPa 各工况路面沉降



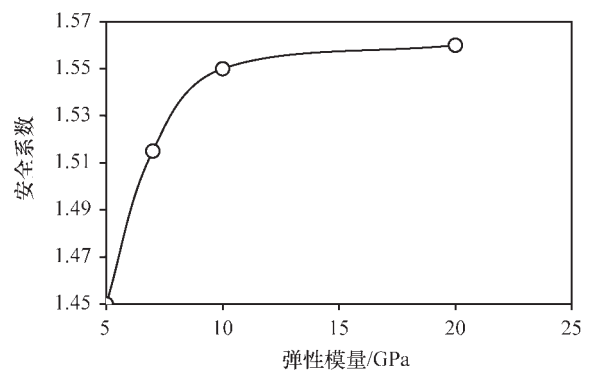
(b) 桩距 2 m 各工况路面沉降

图 8 桩弹性模量、桩距对路面沉降的影响

Fig.8 The influence of elastic modulus and pile spacing on the pavement settlement



(a) 桩弹性模量 10 GPa 各工况安全系数



(b) 桩距 2 m 各工况安全系数

图 9 桩弹性模量、桩距对安全系数的影响

Fig.9 The influence of elastic modulus and pile spacing on the safety of factors

4 结论

1) 路堤中心线两侧的桩均受到方向相反的侧向荷载,桩身土压力随桩距离路堤中心距离增大而减小。路堤下不同位置的桩对软弱层滑动的阻滑作用不同,各工况距路堤中心较远的桩承受侧向荷载较大,距路堤中心线近的桩承受路堤竖向荷载较大,因而不同位置的桩对路堤稳定贡献的机理不同。

2) 刚性桩的弹性模量和嵌固深度对刚性桩受力状态和水平位移影响有限;桩距对刚性桩桩身所承受的桩身土压力、竖向应力、水平位移影响均较为显著。

3) 在桩距与桩弹性模量的影响因素中,桩距是影响路堤加固效果的最主要影响因素。

4) 对比分析下,本工程刚性群桩桩距选择为2 m,弹性模量选择为10 GPa。

参考文献:

[1] 蒋鑫,魏永幸,邱延峻.斜坡软弱地基填方工程数值仿真[J].交通运输工程学报,2002,2(3):41-46.
 [2] 蒋鑫,邱延峻,魏永幸.基于强度折减法的斜坡软

- 弱地基填方工程特性分析[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(4): 622-627.
- [3] 魏永幸, 罗强, 邱延峻. 渝怀线斜坡软弱地基填方工程特性及工程技术研究报告[R]. 成都: 铁道第二勘察设计院, 2005.
- [4] 魏永幸. 松软倾斜地基填方工程安全性评价方法[J]. 地质灾害与环境保护, 2001, 12(2): 73-79.
- [5] 张良, 魏永幸, 罗强. 基于离心模型试验的斜坡软弱土地基路堤变形特性研究[J]. 铁道建筑技术, 2004(1): 51-53.
- [6] 蒋鑫, 刘晋南, 黄明星. 抗滑桩加固斜坡软弱地基路堤的数值模拟[J]. 岩土力学, 2012, 33(4): 1261-1267.
- [7] 罗强, 胡勇刚, 张良. 水泥土搅拌法加固斜坡软弱土地基的土工离心模型试验研究[J]. 中国铁道科学, 2010, 31(4): 12-19.
- [8] QIU Yanjun, WEI Yong, LUO Qiang. Highway embankments over sloped ground and influence on pavement responses[C]//PENG Qiyuan, WANG Kelvin, QIU Yanjun, et al. Proceedings of the International Conference on Transportation Engineering 2007(ICTE 2007). [S.l.]: ASCE, 2007: 1615-1620.
- [9] JIANG Xin, QIU Yanjun, WEI Yongxing, et al. Application of SSRM in stability analysis of subgrade embankments over sloped weak ground with FLAC3D[C]//CHEN Zzuyu, ZHANG Jianmin, LI Zhonggui, et al. Landslides and Engineered Slopes From the Past to the Future: Proceedings of 10th International Symposium on Landslides and Engineered Slopes. London: Thylor & Francis Group, 2008: 741-746.
- [10] 张良, 魏永幸, 罗强. 基于离心模型试验的斜坡软弱土地基路堤加固方案研究[J]. 铁道工程学报, 2004(1): 73-76.
- [11] 池淑兰, 孔书祥, 梁明学. 路基及支挡结构[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2001: 21-28.

(责任编辑 王利君)

(上接第43页)

软砂土力学特性。排除了钙质砂颗粒破碎导致试样强度突然降低的原因。进一步确定细小颗粒诱发扁平状大颗粒钙质砂出现定向滑移是导致钙质砂出现应变软化的主要因素。

4) 细小颗粒对钙质砂的强度机理有所影响, 细小颗粒的缺失导致试样内摩擦角减小, “黏聚力”增大, 但对最终的剪切强度影响不大。

参考文献:

- [1] 吴京平, 楼志刚. 钙质砂的基本特性[C]//第七届全国土力学及基础工程学术会议论文集. 北京: 中国建筑工业出版社, 1994: 267-271.
- [2] 吴京平, 褚瑶, 楼志刚. 颗粒破碎对钙质砂变形及强度特性的影响[J]. 岩土工程学报, 1997, 19(5): 49-55.
- [3] 刘崇权, 汪稔, 吴新生. 钙质砂物理力学性质试验中的几个问题[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(2): 209-212.
- [4] 张家铭, 汪稔, 石祥锋, 等. 侧限条件下钙质砂压缩与破碎特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(18): 3327-3331.
- [5] 孙吉主, 汪稔. 钙质砂的颗粒破碎和剪胀特性的围压效应[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(4): 641-644.
- [6] DATTA M, GULHATI S K, RAO G V. Crushing of Calcareous Sands during Shear[J]. Society of Petroleum Engineers Journal, 1980, 20(2): 77-85.
- [7] 蒋礼. 南海钙质砂破碎力学特性研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2014.
- [8] 张家铭, 张凌, 刘慧, 等. 钙质砂剪切特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(Z): 3010-3015.
- [9] 张家铭, 蒋国盛, 汪稔. 颗粒破碎及剪胀对钙质砂抗剪强度影响研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(7): 2043-2048.
- [10] FAHEY M. The response of calcareous soil in static and cyclic triaxial test[C]//Proceedings of International Conference on Calcareous Sediments. Rotterdam: Balkema A A, 1988: 61-68.
- [11] 孙吉主, 汪稔. 围压对钙质砂变形特性和声发射模式的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(Z): 1173-1176.
- [12] 汪稔, 孙吉主. 钙质砂不排水性状的损伤—滑移耦合作用分析[J]. 水利学报, 2002, 33(7): 75-78.
- [13] GB/T 50123-1999, 土工试验方法标准[S].
- [14] 刘恩龙. 岩土破损力学: 结构块破损机制与二元介质模型[J]. 岩土力学, 2010(Z): 13-22.
- [15] 沈珠江. 理论土力学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009: 51-60.

(责任编辑 王利君)