

刚柔性桩加筋垫层复合地基承载性状数值分析

刘开富,许家培,曹玲珑

(浙江理工大学建筑工程学院,杭州 310018)

摘 要:对刚柔性桩加筋垫层复合地基的承载性状进行数值分析,通过 PLAXIS 3D 软件建立三维有限元模型,分析垫层模量、土工格栅层数、桩间距及刚性桩桩长对刚柔性桩加筋垫层复合地基承载性状的影响。结果表明:当荷载较小时,土工格栅层数、刚性桩桩长及桩间距对复合地基沉降影响较小;当荷载较大时,复合地基沉降随着垫层模量、土工格栅层数及刚性桩桩长的增大而增大,随着桩间距的减小而增大;垫层模量和土工格栅模量对桩土荷载分担比的影响较小;增大桩间距,刚性桩和柔性桩的荷载分担比均有所减小;增大刚性桩桩长,刚性桩荷载分担比增大明显,柔性桩荷载分担比略有减小。

关键词:刚柔性桩;复合地基;沉降;荷载分担比;数值分析

中图分类号: TU472.3

文献标志码: A

文章编号: 1673-3851(2018)05-0372-06

0 引 言

近年来,我国道路建设发展迅速,土地资源日益紧张,许多道路不得不建在软土地基上。因软土地基具有高压缩性、低透水性、高灵敏性、含水量高、强度低等特点^[1],在长期荷载作用下,软土路基容易产生较大的沉降与差异沉降,损坏道路结构,影响道路的正常使用寿命,甚至引发桥头跳车等病害。采用刚柔性桩加筋垫层复合地基技术处理柔性基础下的软土地基,能够有效提高地基承载力、减少沉降、限制不均匀沉降,且工期较短、经济效益良好,是一种有效的软土地基处理办法^[2-3]。

由于刚柔性桩加筋垫层复合地基的应用时间较短,相关研究还不够透彻,目前学者对于刚、柔性桩加筋垫层复合地基的相关研究主要通过理论分析、试验研究和数值模拟进行。在理论分析方面,郭帅杰等^[4]针对桩间土应力不均匀分布的情况,计算桩体荷载分担比,建立了相对合理的路基填土土拱效应优化算法;俞缙等^[5]针对柔性桩承式加筋路堤,考虑土拱效应、拉膜效应和桩土相互作用三者耦合情

况,建立平衡方程,推导出桩土应力比及桩土差异沉降计算公式。在试验研究方面,鲍树峰^[6]通过开展现场试验,研究刚柔性桩-网复合地基在深厚软土路基中的工作性状,肯定了刚柔性桩-网复合地基用于控制深厚软土路基工后沉降的可行性;朱奎等^[7]进行了现场试验,结果表明,在刚柔性桩复合地基中设置褥垫层有利于桩土共同作用的发挥。在数值模拟方面,谢新宇等^[8]及 Liu 等^[9]运用数值方法研究了垫层厚度、垫层模量、短桩模量和长桩长度对刚柔性桩复合地基的沉降、长短桩应力比的影响;张宽^[10]利用有限元软件模拟实际工况,对比分析数值计算结果与实际测试结果,验证了数值方法运用于刚柔性桩复合地基设计计算中的可行性与计算精度的可用性;李善珍等^[11]结合实际工程,运用 MIDAS/GTS 有限元软件,分析桩长、桩间距和下卧层刚度对复合地基工作性状的影响;李波等^[12]采用有限元方法探讨并分析了长短桩组合路堤桩土拱效应的形成机制和基本模式,改进了等长路堤桩的 Hewlett 方法,提出了适用于长短组合路堤桩及等长桩路堤桩两种情况的三维复合土拱效应分析方法;杨涛等^[13]根据有

收稿日期:2017-12-09 网络出版日期:2018-02-27

基金项目:国家自然科学基金项目(51678533);浙江省自然科学基金项目(LY13E090010)

作者简介:刘开富(1977-),男,山东费县人,副教授,博士,主要从事软黏土力学及地基处理、边坡稳定性分析等方面的研究。

限元计算结果,分析了桩承式路堤中土拱的形态及影响土拱高度的主要因素;庄妍等^[14-15]通过 ABAQUS 软件建立三维有限元分析模型,研究了桩承式路堤中的土拱效应作用机理及加筋体工作机理。从以上分析可见,复合地基的数值分析多见于土拱效应分析,对承载性状的分析较少,对刚柔性桩加筋垫层复合地基承载性状的研究尚不足。

本文采用 PLAXIS 3D 有限元软件建立刚柔性桩加筋垫层复合地基分析模型,通过改变垫层模量、土工格栅层数、桩间距及刚性桩桩长,探究不同影响因素下刚柔性桩加筋垫层复合地基承载性状。

1 有限元模型及参数确定

1.1 有限元模型的建立

考虑减小边界效应的同时提高计算精度,选取 6 根柔性桩及 2 根刚性桩加固范围内的局部地基进行分析,取地基模型尺寸为 20.0 m×15.0 m×25.0 m,沿着深度方向为 3.0 m 厚砂垫层、2.0 m 厚粉质粘土、8.0 m 厚淤泥质黏土和 15.0 m 厚粉质粘土。基准组模型布置如下:桩体按梅花形布置,刚性桩采用桩径为 0.5 m、长 12.0 m 的混凝土桩,其顶部设置 1.0 m×1.0 m×0.2 m 的桩帽;柔性桩采用桩径为

0.5 m、长 8.0 m 的水泥土搅拌桩,桩间距取 10 倍桩径;桩顶 0.2 m 的平面上设置一层土工格栅作为水平向加筋体(当需设置两层及以上土工格栅时,每层土工格栅之间的距离取 0.50 m);垫层模量取 80 MPa;加载范围取 13.0 m×8.0 m。三维有限元模型示意图如图 1 所示。

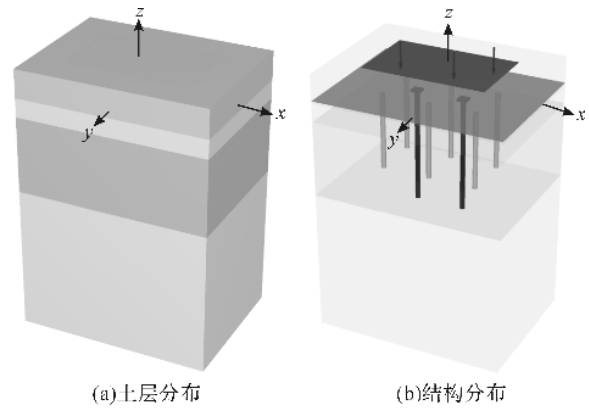


图 1 三维有限元模型

1.2 本构模型及参数设置

有限元分析中粉质粘土和淤泥质黏土采用 Soft soil 模型;砂垫层采用经典的 Mohr-Coulomb 模型;混凝土桩、水泥土搅拌桩和土工格栅则采用 Linear elastic 模型,相应土层及材料参数如表 1—表 3 所示。

表 1 粉质粘土及淤泥质黏土材料参数

材料	材料行为	天然重度 $\gamma_{\text{unsat}}/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	饱和重度 $\gamma_{\text{sat}}/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	初始孔隙比 e_{int}	修正压缩指数 λ^*	修正回弹指数 κ^*	有效粘聚力 c'/kPa	有效摩擦角 $\varphi'/(^{\circ})$	剪胀角 $\psi/(^{\circ})$
粉质粘土	不排水	17.5	18.5	0.90	0.15	0.03	15.0	26.0	0
淤泥质黏土	不排水	16.0	17.0	1.325	0.05	0.01	15.0	12.5	0

表 2 砂垫层材料参数

材料	材料行为	重度 $\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	初始孔隙比 e_{int}	弹性模量 E'/MPa	泊松比 ν	有效粘聚力 c'/kPa	有效摩擦角 $\varphi'/(^{\circ})$
砂垫层	排水	17.0	0.50	80	0.25	1.0	36.0

表 3 桩和土工格栅材料参数

材料	重度 $\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	弹性模量 E'/MPa	泊松比 ν	土工格栅模量 $EA/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-1})$
混凝土桩	23.25	2.8×10^4	0.20	—
水泥土搅拌桩	20.0	8.0×10^2	0.20	—
土工格栅	—	—	—	600.0

1.3 模型条件设置

考虑复合地基上路堤的逐层填筑过程,采用 1000 kN/级进行分级加载,等效作用在垫层顶部的均布荷载为 19.23 kPa/级;桩土间相互作用的粗糙程度通过强度折减系数控制,该系数将界面强度(桩体粘聚力和摩擦角)与土体强度(土体粘聚力和摩擦角)联系起来,强度折减系数大小根据土层情况分别选择(为方便计算,同一土层的强度折减系数取值相

同),本文中粉质粘土的强度折减系数设置为 0.67,淤泥质黏土设置为 0.60。土工格栅与土体间不设置接触,可认为土工格栅与土体间不产生相对滑移,土工格栅随土体一起变形;考虑模型仅取地基的局部加固区域,因此可认为仅产生竖向位移而不产生侧向位移,故设置模型竖向边界条件 Z_{min} 、 Z_{max} 为打开,设置模型水平向边界条件 X_{min} 、 X_{max} 、 Y_{min} 、 Y_{max} 为关闭(Z_{min} 、 Z_{max} 分别为沿深度方向模型底部和顶

部边界, X_{\min} 、 X_{\max} 、 Y_{\min} 、 Y_{\max} 分别为水平方向上模型四周边界)。

2 有限元结果分析

2.1 不同垫层模量下的刚柔性桩加筋垫层复合地基的承载性状

图2为垫层模量分别为40、80、120 MPa及160 MPa时刚柔性桩一层土工格栅垫层复合地基沉降随荷载变化曲线。由图2可知,复合地基沉降随着荷载增大而增大;荷载在一定范围内时,复合地基沉降随着荷载增大基本呈线性增长,而当荷载超过一定值后,复合地基沉降增量明显增大,这表明地基土已进入局部剪切状态。由图2还可发现,在同级荷载下,复合地基沉降随着垫层模量的增大而减小;随着垫层模量的增大,沉降增量也逐渐减小;如在10000 kN荷载下,垫层模量由40 MPa增大到80 MPa时,复合地基沉降减小了9.94 mm,而垫层模量由120 MPa增大到160 MPa时,复合地基沉降只减小了3.10 mm,这说明垫层模量对复合地基沉降影响十分明显。由此可见,垫层模量较低时提高垫层模量能够明显减小复合地基沉降,但随着垫层模量逐渐增大,垫层模量对复合地基减沉效果逐渐减弱。

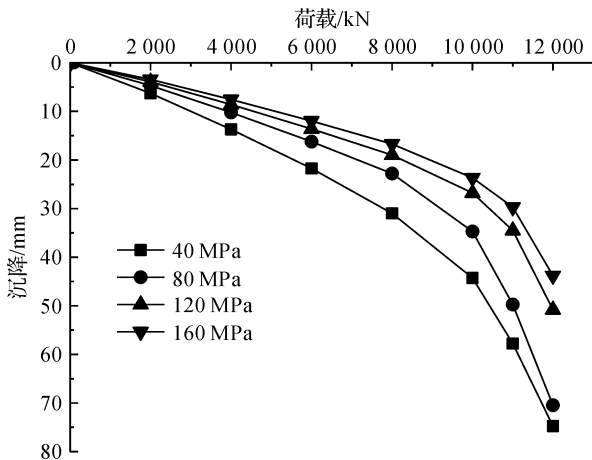


图2 不同垫层模量下刚柔性桩一层土工格栅垫层复合地基沉降随荷载变化曲线

图3为荷载10000 kN时刚柔性桩一层土工格栅垫层复合地基的桩土荷载分担比随垫层模量变化曲线。由图3可知,随着垫层模量的增大,刚性桩和柔性桩所承担的荷载逐渐增大,而桩间土所承担的荷载逐渐减小,但变化幅度并不明显。垫层模量为40 MPa时桩间土承担了90.05%的荷载,当垫层模量增大到160 MPa时,桩间土承担了87.00%的荷载,可见垫层模量提高了3倍但桩间土所承担的荷载仅减小了3.05%,这表明改变垫层模量对复合地

基桩土荷载分担比具有一定影响,垫层模量对桩土荷载分担比的影响相对较小。由图3还可发现,尽管刚性桩数量只有柔性桩的三分之一,但因刚性桩上的桩帽存在及刚性桩的受力特性,刚性桩所承担的荷载大于柔性桩所承担的荷载。

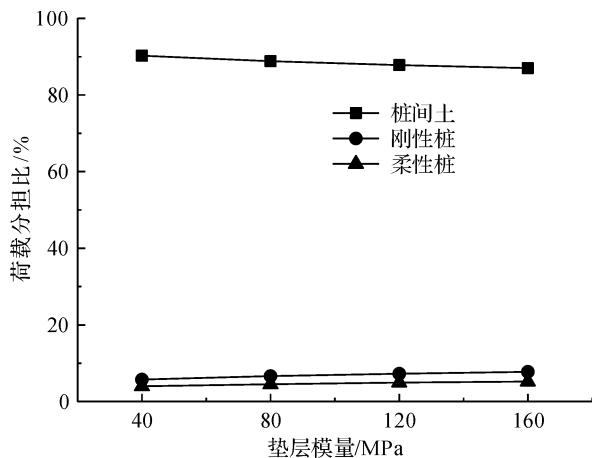


图3 10000 kN时刚柔性桩一层土工格栅垫层复合地基的桩土荷载分担比随垫层模量变化曲线

2.2 不同土工格栅层数下的刚柔性桩加筋垫层复合地基的承载性状

图4为不同土工格栅层数下刚柔性桩加筋垫层复合地基沉降随荷载变化曲线。由图4可知,当荷载较小时土工格栅层数对复合地基沉降影响不大,当荷载较大时复合地基沉降随土工格栅层数增加而减小,如荷载为8000 kN时,不同土工格栅层数下的复合地基沉降均在22.80 mm左右,荷载增大到12000 kN时,同一层土工格栅下的沉降(70.46 mm)相比,两层土工格栅下的沉降为62.83 mm,减小了10.83%,三层土工格栅下的沉降为53.37 mm,减小了25.25%,说明土工格栅层数对复合地基沉降的影响集中在荷载较大时。

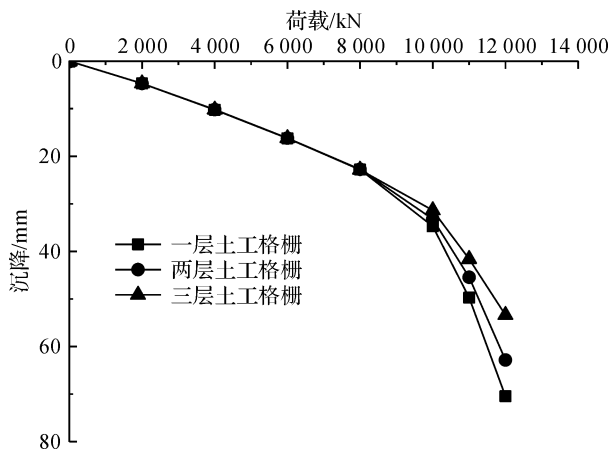


图4 不同土工格栅层数下刚柔性桩加筋垫层复合地基沉降随荷载变化曲线

图5为荷载10000 kN时刚柔性桩加筋垫层复合地基的桩土荷载分担比随土工格栅层数变化曲线。由图5可知,桩的荷载分担比随着土工格栅层数增加略有增大,但增大幅度并不明显。采用一层土工格栅时,桩间土承担了88.81%荷载,比采用两层土工格栅时(87.81%)仅增大了1.00%,比采用三层土工格栅时(86.88%)也仅增大了1.93%,说明增加土工格栅层数能提高桩体荷载分担比,但提升的效果不太明显。

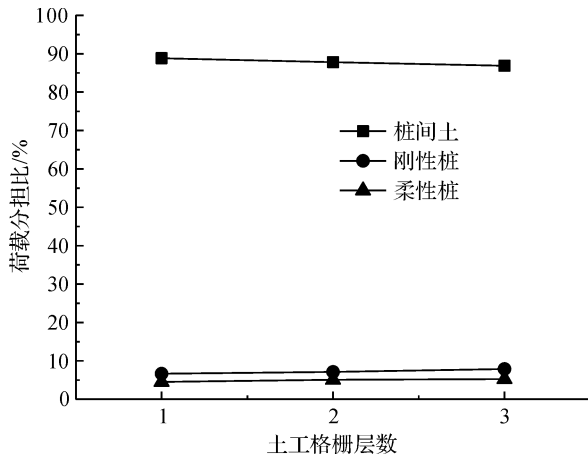


图5 10000 kN时刚柔性桩加筋垫层复合地基的桩土荷载分担比随土工格栅层数变化曲线

2.3 不同桩间距下刚柔性桩加筋垫层复合地基的承载性状

图6为不同桩间距下刚柔性桩一层土工格栅垫层复合地基的沉降随荷载变化曲线。由图6可知,复合地基沉降随着桩间距增大而增大;当荷载较小时,桩间距对复合地基沉降影响较小;随着荷载增大,桩间距对复合地基沉降的影响逐渐增大,如荷载为8000 kN时,10倍桩间距下的沉降为22.79 mm,仅比6倍桩间距下的沉降(19.83 mm)大了2.96 mm,当荷载增大到12000 kN时,10倍桩间距下的沉降为70.46 mm,比6倍桩间距下的沉降(34.14 mm)大了36.32 mm,远大于8000 kN时的沉降差。由此可见,当荷载较大时,桩间距对复合地基沉降的影响显著。

图7为荷载10000 kN时刚柔性桩一层土工格栅垫层复合地基桩土荷载分担比随桩间距变化曲线。由图7可知,桩体的荷载分担比随着桩间距增大而减小,桩间土的荷载分担比则随之增大;如桩间距从6倍增大到10倍时,刚性桩的荷载分担比由14.16%减小到了6.65%,柔性桩荷载分担比则由9.26%减小到了4.54%,相应的桩间土荷载分担比增大了11.56%,由此可见桩间距对荷载分担比影响显著,采用较小桩间距能够有效降低桩间土所承

载的荷载,充分发挥桩的承载性能,因此需要综合考虑桩的承载能力和工程经济性,选择合理的桩间距。

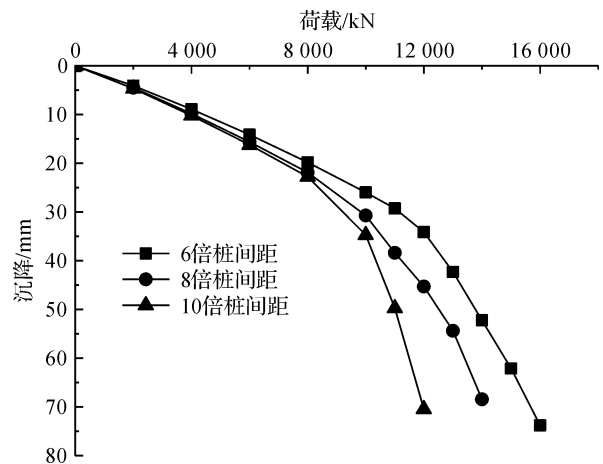


图6 不同桩间距下刚柔性桩一层土工格栅垫层复合地基沉降随荷载变化曲线

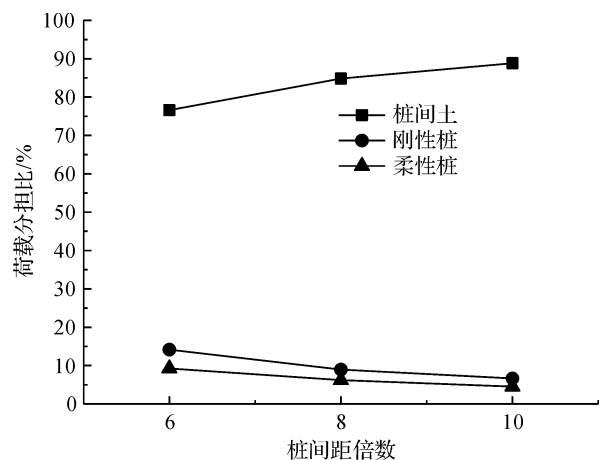


图7 10000 kN时刚柔性桩一层土工格栅垫层复合地基桩土荷载分担比随桩间距变化曲线

2.4 不同刚性桩桩长下刚柔性桩加筋垫层复合地基的承载性状

图8为不同刚性桩桩长时刚柔性桩一层土工格栅垫层复合地基沉降随荷载变化曲线。由图8可知,复合地基沉降随着刚性桩桩长的增大而减小;荷载较小时,刚性桩桩长对复合地基沉降影响不大;刚性桩桩长越长,土体进入局部剪切状态所需的荷载越大,如荷载为8000 kN时,不同刚性桩桩长下的沉降均在22.50 mm左右,荷载增大到10000 kN时,9 m和12 m刚性桩桩长下的复合地基已进入局部剪切状态,其沉降分别达到了57.38 mm和34.73 mm,而15 m和18 m刚性桩桩长下的沉降在29.50 mm左右,尚未进入破坏状态。由此可见,刚性桩桩长对复合地基沉降影响显著,增加刚性桩桩长可以提高复合地基的承载性能。

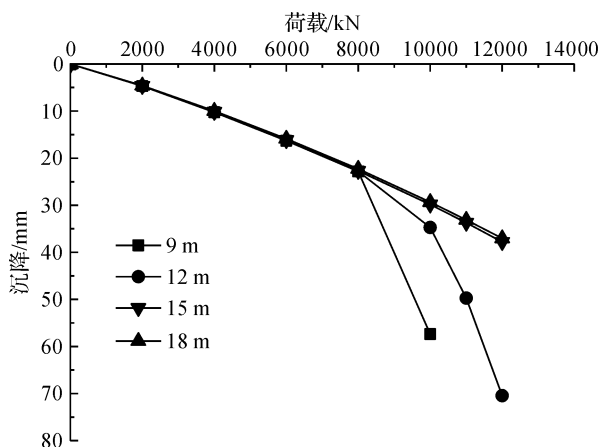


图8 不同刚性桩桩长时刚柔性桩一层土工格栅垫层复合地基沉降随荷载变化曲线

图9为荷载10000 kN时刚柔性桩一层土工格栅垫层复合地基桩土荷载分担比随刚性桩桩长变化曲线。由图9可知,刚性桩荷载分担比随着刚性桩桩长增大而增大,柔性桩和桩间土荷载分担比随着刚性桩桩长增大而减小。刚性桩桩长由9 m增大到12 m时,刚性桩荷载分担比提高了4.92%,柔性桩荷载分担比减小了0.98%,桩间土荷载分担比减小了3.94%,由此可见,增大刚性桩桩长不仅可以有效提高刚性桩的荷载分担比,还可适当降低柔性桩荷载分担比。对比图8和图9可见,增大刚性桩桩长可以有效改善刚性桩与桩间土的荷载分配情况,提高复合地基承载能力。

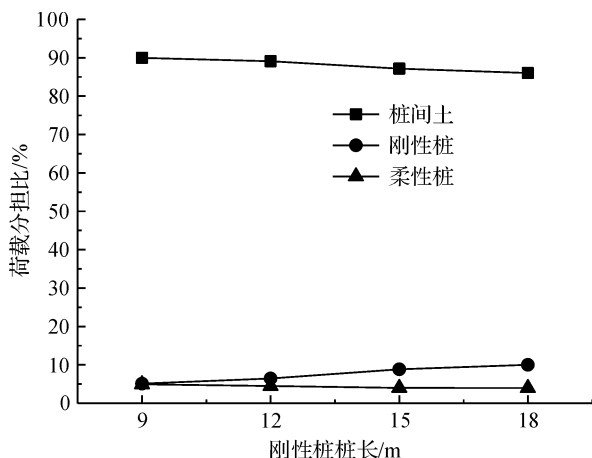


图9 10000 kN时刚柔性桩土一层土工格栅垫层复合地基桩土荷载分担比随刚性桩桩长变化曲线

3 结论

本文通过 PLAXIS 3D 软件建立了刚柔性桩加筋垫层复合地基的三维有限元模型,分析了垫层模量、土工格栅层数、桩间距、刚性桩桩长对复合地基沉降和荷载分担比的影响,得到以下结论:

a) 复合地基沉降随着垫层模量、土工格栅层数、刚性桩桩长的增大而减小,随着桩间距的增大而增大;荷载较小时,土工格栅层数、刚性桩桩长及桩间距对沉降影响较小;随着荷载增大,不同垫层模量、土工格栅层数、桩间距及刚性桩桩长下的沉降差异逐渐明显,可以通过优化这些参数提高复合地基的承载能力。

b) 垫层模量和土工格栅模量对桩土荷载分担比的影响较小;增大桩间距,刚性桩和柔性桩的荷载分担比均有所减小;增大刚性桩桩长,刚性桩荷载分担比增大明显,柔性桩荷载分担比略有减小,说明增大刚性桩桩长可以优化刚性桩与桩间土的荷载分配情况。

参考文献:

- [1] 施尚伟. 深厚软土地区长短桩复合地基工程性状研究[D]. 杭州:浙江大学,2006:1-22.
- [2] 张先军,赵世运. 哈大高速铁路新营口车站组合桩复合地基的应用研究[J]. 铁道工程学报,2011(5):34-39.
- [3] 孙凤玲. 柔性荷载下刚柔长短组合桩-网复合地基性状研究[D]. 杭州:浙江大学,2011:36-50.
- [4] 郭帅杰,宋绪国,罗强,等. 基于 Hewlett 方法的桩网复合地基土拱效应优化算法[J]. 铁道标准设计,2015,60(5):16-23.
- [5] 俞缙,周亦涛,鲍胜,等. 柔性桩承式加筋路堤桩土应力比分析[J]. 岩土工程学报,2011,33(5):705-713.
- [6] 鲍树峰. 刚柔长短组合桩-网复合地基工作性状研究[J]. 铁道工程学报,2014,31(7):24-29,79.
- [7] 朱奎,徐日庆. 有无褥垫层刚柔性桩复合地基性状对比研究[J]. 岩土工程学报,2006,28(10):1230-1235.
- [8] 谢新宇,杨相如,施尚伟,等. 刚柔性长短桩复合地基性状分析[J]. 岩土力学,2007,28(5):877-882.
- [9] Liu K, Xie X, Shi S, et al. Numerical analysis on the performance of a cushioned foundation with a mixture of both rigid and flexible piles[C]//Proceedings of the US-China Workshop on Ground Improvement Technologies. Orlando: American Society of Civil Engineering, 2009: 102-111.
- [10] 张宽. 客运专线刚柔性桩复合地基沉降特性分析[D]. 成都:西南交通大学,2010:39-63.
- [11] 李善珍,马学宁,田兆斌. 路堤荷载下长短桩加固黄土地基影响因素的分析[J]. 铁道科学与工程学报,2017,14(2):241-249.
- [12] 李波,黄茂松. 长短桩组合路堤桩三维复合拱土拱效应分析[J]. 岩土力学,2013,34(1):203-210,220.
- [13] 杨涛,王刚刚,闫业强,等. 桩承式路堤中土拱形态与成拱过程中土拱效应研究[J]. 岩土工程学报,2014,36(4):731-735.

- [14] 庄妍,王康宇,刘汉龙. 桩承式路堤中加筋体工作机理研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(s1): 294-299.
- [15] 庄妍,崔晓艳,刘汉龙. 桩承式路堤中土拱效应产生机理研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(s1): 118-123.

Numerical analysis on bearing behavior of rigid-flexible pile composite foundation with reinforced cushion

LIU Kaifu, XU Jiapei, CAO Linglong

(School of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Due to the bearing behavior numerical analysis of rigid-flexible pile composite foundation with reinforced cushion is not too many, a finite element model is established via PLAXIS 3D to analyze the effect of cushion modulus, geogrid layer number, distance between piles and length of rigid pile to bearing behavior of the composite foundation. The result of numerical calculation shows that the geogrid layer number, distance between piles and length of rigid pile has little effects on settlement of composite foundation under a low load. When a high load is applied, the settlement of composite foundation increases with the increase of cushion modulus, geogrid layer number, length of rigid pile and the decrease of distance between piles. The cushion modulus and geogrid layer number has a little influence on the load sharing ratio of piles and soil. The load sharing ratio of rigid piles and flexible piles decreases when the distance of piles increase. As the increasing of the distance of rigid piles, the load sharing ratio of the rigid pile has a visibly increase and that of flexible pile has a slight decrease.

Key words: rigid-flexible pile; composite foundation; settlement; load sharing ratio; numerical analysis

(责任编辑: 康 锋)