

加筋碎石桩复合地基承载力影响因素分析

Analysis on Influencing Factors of Bearing Capacity of Reinforced Gravel Pile

林培忠, 刘 桢, 陈 昊

(河南省自然资源监测和国土整治院, 郑州 450016)

摘 要: 为研究不同影响因素下加筋碎石桩复合地基承载力学性能特征, 考虑群桩效应, 采用 FLAC 3D 软件建立了加筋碎石桩复合地基承载力计算数值模拟模型, 对不同桩径、桩距与桩径比值、加筋体刚度、桩体模量以及垫层厚度 5 种因素条件下复合地基沉降以及桩体变形随竖向荷载的变化规律展开了数值模拟分析。结果表明: 随着加筋碎石桩桩距与桩径比值、加筋体刚度以及垫层厚度的增加, 加筋碎石桩复合地基最大沉降均呈指数衰减式减小; 为提高加筋碎石桩复合地基的承载能力, 加筋碎石桩的桩距与桩径比值不能超过 5, 加筋体的整体刚度宜为 2 000 kN/m 左右, 垫层的厚度不能超过 0.5 m; 随着桩径的减小, 加筋碎石桩复合地基沉降会呈现线性减小的趋势, 但工程造价增加, 在实际工程设计中, 应根据使用要求和经济水平来选择加筋碎石桩的桩径大小。

关键词: 加筋碎石桩; FLAC 3D; 桩距与桩径比值; 加筋体刚度; 垫层厚度

中图分类号: TU47

文献标志码: A

文章编号: 1005-8249 (2025) 05-0103-07

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.05.019

LIN Peizhong, LIU Zhen, CHEN Hao

(Institute of Natural Resources Monitoring and Comprehensive Land Improvement of
Henan Province, Zhengzhou 450016, China)

Abstract: In order to study the bearing mechanical properties of reinforced gravel pile composite foundation under different influencing factors, a numerical simulation model for calculating the bearing capacity of reinforced gravel pile composite foundation was established by FLAC 3D software. The numerical simulation analysis was carried out on the settlement of composite foundation and the variation of pile deformation with vertical load under the conditions of different pile diameter, ratio of pile spacing to pile diameter, reinforcement stiffness, pile modulus and cushion thickness. The results show that: With the increase of the ratio of pile spacing to pile diameter, the stiffness of the reinforced body and the thickness of the cushion, the maximum settlement of reinforced gravel pile composite foundation decreases exponentially. In order to improve the bearing capacity of reinforced gravel pile composite foundation, the ratio of pile spacing to pile diameter of reinforced gravel pile should not exceed 5, the overall stiffness of the reinforced body should be about 2000 kN/m, and the thickness of the cushion should not exceed 0.5 m. With the decrease of the pile diameter, the settlement of the reinforced gravel pile composite foundation will show a linear decreasing trend. However, increase of the project cost, in the actual engineering design, the pile diameter of

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52374087)。

作者简介: 林培忠 (1973—), 男, 本科, 高级工程师, 主要研究方向: 土地资源管理与地质工程。

收稿日期: 2024-03-26

岩土力学

the reinforced gravel pile should be selected according to the use requirements and economic level.

Key words: reinforced gravel pile; FLAC 3D; ratio of pile spacing to pile diameter; stiffness of the reinforced body; cushion thickness

0 引言

传统的碎石桩因缺少足够的侧向约束作用，易在竖向荷载作用下发生膨胀变形破坏，导致承载力明显降低^[1-2]。碎石桩外侧包裹上一层土工合成材料（加筋体）是通过增强侧向约束力来提高碎石桩承载能力的方法，于是，一种新兴的软土地基加固技术—加筋碎石桩^[3-4]孕育而生，并在软土路基工程施工中得到广泛的应用。

为研究加筋碎石桩复合地基的承载力与变形特性，谢忠勇等^[5]和袁海清^[6]提出了加筋碎石桩处理软基的方法，探讨了其力学参数及计算理论；赵明华等^[7]分析了加筋碎石桩复合地基的承载机理，探讨了加筋碎石桩复合地基的几种破坏模式；韩剑飞等^[8]分析了格栅单宽极限抗拉强度、加筋深度、桩径和摩擦角对单桩极限承载力的影响；陈建峰等^[9]、李丽华等^[10]研究了套筒长度、加筋间距及加筋组合方式对加筋碎石桩复合地基路堤变形和稳定性的影响；黄世斌等^[11]基于室内试验结果建立了离散-连续耦合模型，分析了应力在桩体中的传递规律、径向应力系数的相关影响因素、桩体和土工格栅中力链的发展规律以及加筋碎石桩的破坏模式；Gao等^[12]通过模型试验阐述了加筋碎石桩沉降和桩土应力比的变化，以模型试验为背景，采用颗粒流法对加筋碎石桩复合地基进行了数值模拟，研究了其荷载传递和膨胀特性；Zhang等^[13]采用三维水力-力学耦合有限元模型，研究了基础加筋碎石桩支护的浮式路堤的性能，对基层土的一致性、基础加筋和围护结构的抗拉刚度、路堤高度等控制因素进行了综合参数分析；王家全等^[14]基于室内试验建立ABAQUS三维有限元计算模型，分析碎石内摩擦角、碎石弹性模量和土工格栅弹性模量对桩体承载力、桩身侧向变形和桩土应力比的影响，探讨分析了3个参数提高桩体承载性能的作用机理；郭跃飞等^[15]基于竹筋格栅套筒加筋碎石桩在竖向荷载作用下的受力变形特征，分析了其承载机理和破坏模式；根据

极限平衡理论对两种常见破坏模式下的竹筋格栅套筒加筋碎石桩的单桩极限承载力计算公式进行了理论推导，并得出竹筋格栅抗拉强度和套筒长度是桩体破坏模式的判定依据。

上述研究成果为促进加筋碎石桩技术发展发挥了重要作用，然而却很少考虑群桩与土之间的相互耦合作用，对影响加筋碎石桩复合地基承载力和变形特性的多种因素进行分析。因此，考虑群桩效应，采用FLAC 3D对不同桩径、桩距与桩径比值、加筋体刚度、桩体模量以及垫层厚度5种因素条件下复合地基沉降以及桩体变形随竖向荷载的变化规律展开研究分析，研究结果对加筋碎石桩的设计与施工具有重要的参考价值。

1 加筋碎石桩复合地基承载力影响因素分析数值模拟方案设计

1.1 工程概况

某加筋碎石桩复合地基采用下开口钢套管挖孔回填碎石方式成桩，加筋碎石桩呈正方形布置，长度为6.0 m，直径为0.8 m，桩间距与桩径比值为3，桩体以及褥垫层材料采用级配良好的碎石，褥垫层厚度为0.3 m，加筋体则采用土工格栅^[16]。不同土体和碎石的基本力学参数见表1，土工格栅弹性模量0.5 GPa，厚度5 mm，刚度2 000 kN/m。

表1 加筋碎石桩复合地基土体与碎石的基本力学参数
Table 1 Basic mechanical parameters of soil and gravel in reinforced gravel pile composite foundation

土层名称	厚度 /m	重度 /(kN/m ³)	弹性模量 /MPa	泊松比	内聚力 /kPa	内摩擦角 /(°)
素填土	0.7	20.0	11.5	0.30	9.0	26.2
含黏土质砂	1.8	19.0	14.8	0.28	4.2	28.4
粉质黏土	1.1	17.9	5.8	0.36	8.6	20.3
砾质砂	2.6	20.0	30.2	0.28	1.0	35.4
碎石		23.2	50.4	0.30	3.0	44.5

1.2 模型建立

采用FLAC 3D建立加筋碎石桩复合地基承载力影响因素分析模型如图1所示。模型宽50 m，高6 m，厚度为1倍桩间距，包含76 640个单元和86 860网格点，模型边界条件设定为底部固定，四周侧向位

移约束。进行加筋碎石桩复合地基承载力测试时，作用下复合地基的变形情况。则缓慢增加褥垫层顶部的竖向荷载，研究不同荷载

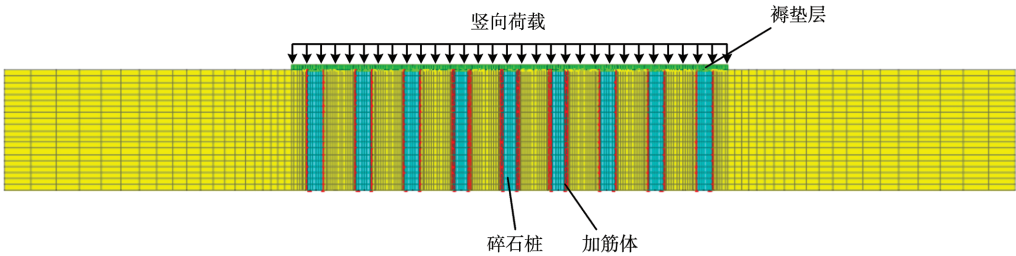


图1 加筋碎石桩复合地基承载力影响因素分析数值模型

Fig.1 Numerical model for analysis of influencing factors of bearing capacity of reinforced gravel pile composite foundation

1.3 方案设计

考虑不同桩径、桩距与桩径比值、加筋体刚度、桩体模量以及垫层厚度这5种因素对复合地基承载力的影响，设计了以下模拟方案。

不同桩径：保持其它条件不变，加筋碎石桩桩径分别为0.6、0.8、1.0、1.2 m。

不同桩距与桩径比值：保持其它条件不变，加筋碎石桩桩距与桩径比值分别为2、3、4、5、6。

不同加筋体刚度：保持其它条件不变，加筋碎石桩加筋体刚度分别为0、1 000、2 000、3 000、4 000 kN/m。

不同桩体模量：保持其它条件不变，加筋碎石桩桩体模量分别为25.2、50.4、100.8、201.6、403.2 MPa。

不同垫层厚度：保持其它条件不变，垫层厚度分别为0.1、0.3、0.5、1.0 m。

1.4 合理性验证

为验证数值模型的合理性，对复合地基中单桩进行承载力测试和数值计算，得到现场测试和数值计算条件下的单根加筋碎石桩桩顶荷载－沉降关系曲线以及桩体外侧侧向位移－深度关系曲线如图2所示。

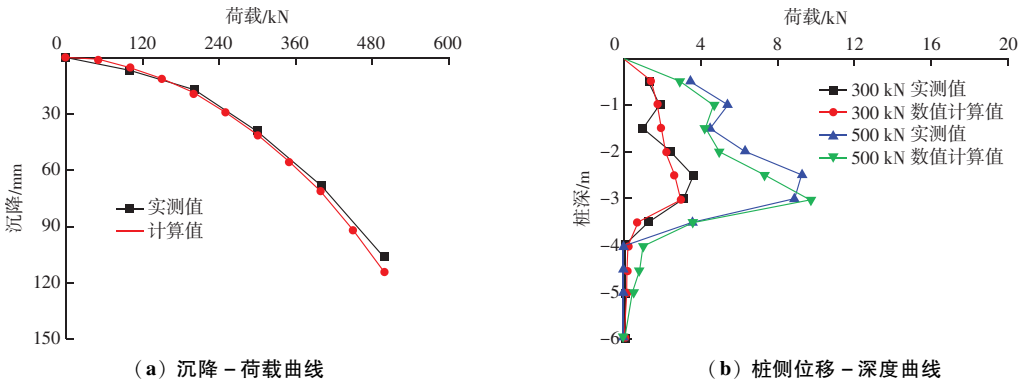


图2 不同荷载下加筋碎石桩的变形实测与数值计算结果

Fig.2 Deformation measurement and numerical calculation results of reinforced gravel pile under different loads

通过数值模拟计算得到的桩顶沉降和桩侧位移大小和变化规律与实测值较为吻合。说明数值模型能较好反映加筋碎石桩在不同荷载条件下的力学响应特征。

2 数值模拟结果分析

2.1 不同桩径

不同桩径条件下加筋碎石桩复合地基的荷载－沉降曲线如图3所示。虽然四种桩径条件下桩体面积置换率都保持一致，但由于桩径越小，加筋碎石桩

的桩间距也越小，桩间土越容易形成土拱，桩土协同作用就越强。因此，桩径越小，相同荷载条件下加筋碎石桩复合地基的沉降也越小，且呈线性减小的趋势，对控制软土变形有利。但另一方面，随着桩径的减小，桩数将增多，加筋体的使用面积也将增大，由此带来工程造价的增加。所以在实际工程设计中，应根据使用要求和经济水平来选择加筋碎石桩的桩径大小。

岩土力学

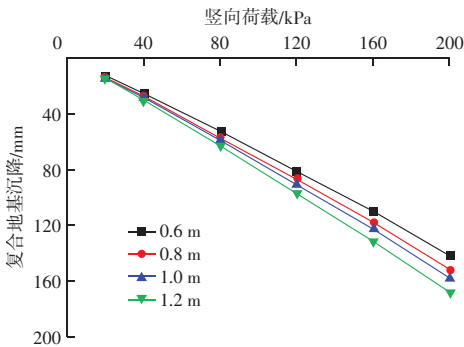


图3 不同桩径条件下复合地基沉降-荷载曲线
Fig. 3 The settlement-load curves of composite foundation under different pile diameters

竖向荷载 200 kPa 时不同桩径条件下加筋碎石桩复合地基外侧桩体的水平位移分布曲线如图 4 所示。不同桩径条件下,加筋碎石桩复合地基外侧桩体水平位移沿桩深方向均呈“弓形”分布,随着加筋碎石桩桩径的增大,加筋碎石桩复合地基桩体水平位移变化主要集中在上方 4 m 区域,变化量不超过 10 mm。可见,受不同应力分布和桩土协同作用的综合影响,桩径变化对复合地基外侧桩体的水平位移影响不是很大。

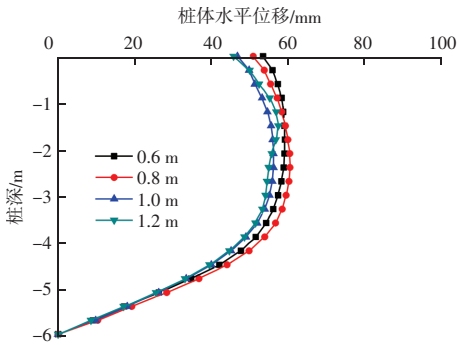


图4 竖向荷载 200 kPa 时不同桩径条件下复合地基外侧桩体的水平位移分布曲线
Fig. 4 The horizontal displacement distribution curve of the outer pile of the composite foundation under different pile diameters under the vertical load of 200 kPa

2.2 不同桩距与桩径比值

不同桩距与桩径比值条件下加筋碎石桩复合地基的荷载-沉降曲线如图 5 所示。由于加筋碎石桩桩距与桩径比值越大,桩间土土拱效应越弱,导致桩间土所受到的荷载越大,其塑性变形也越大,因此,桩距与桩径比值越大,桩间土的沉降越大且沉降速率随荷载变化也越快。相同荷载作用下,复合地基最大沉降随桩距与桩径比值呈指数衰减式分布,当桩距与桩径比值大于 5 时,可以认为桩间土不再产生

土拱效应,此时,桩体的布置对软土地基沉降控制影响很小。因此,加固软土地基时,加筋碎石桩桩距与桩径比值不宜超过 5。

竖向荷载 200 kPa 时不同桩距与桩径比值条件下加筋碎石桩复合地基外侧桩体的水平位移分布曲线如图 6 所示。随着桩距与桩径比值的增大,加筋碎石桩复合地基外侧桩体水平位移随桩距与桩径比值增加出现了一个先增大后减小的变化过程;当桩距与桩径比值为 4 时,复合地基外侧桩体水平位移最大,此时,复合地基外侧桩体最容易发生变形失稳。

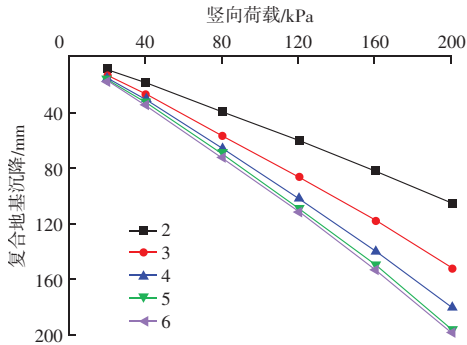


图5 不同桩距与桩径比值条件下复合地基的沉降-荷载曲线
Fig. 5 The settlement-load curves of composite foundation varying under different ratios of pile spacing to pile diameter

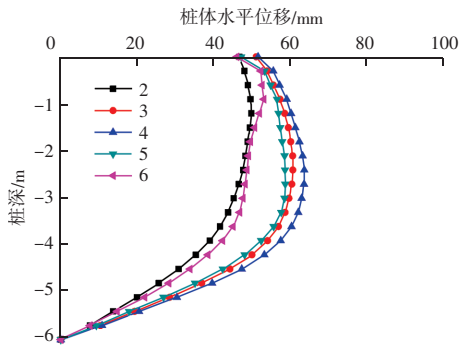


图6 竖向荷载 200 kPa 时不同桩距与桩径比值条件下复合地基外侧桩体的水平位移分布曲线
Fig. 6 The horizontal displacement distribution curve of the outer pile of the composite foundation under different ratios of pile spacing to pile diameter under the vertical load of 200 kPa

2.3 不同加筋体刚度

不同加筋体刚度条件下复合地基的荷载-沉降曲线如图 7 所示。由于碎石桩与加筋体的复合刚度会随加筋体刚度的增大而增大,导致其在相同竖向荷载作用下的沉降和水平位移都减小。而伴随桩体竖向变形和侧向变形的减小,桩间土在横向上的应力叠加效应减弱而竖向上的土拱作用增强。因此,随着加筋体刚度的增大,复合地基最大沉降逐渐减小。

加筋体刚度在由 0 增长至 2 000 kN/m 的过程中, 复合地基沉降减小最为明显, 此后, 随着加筋体刚度的增大, 由于桩与土的刚度相差会越来越大, 导致桩土间的差异沉降也随之增大, 桩土相互作用强度趋于稳定, 桩间土的沉降不再减小。因此, 从性价比的角度考虑, 加筋碎石桩加筋体的整体刚度不宜超过 2 000 kN/m。

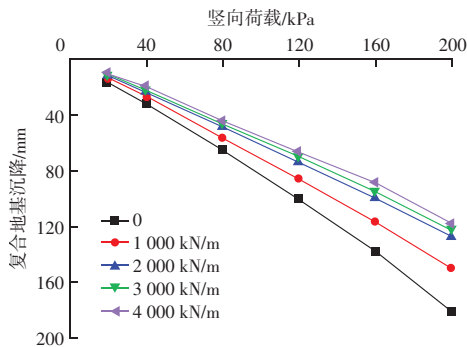


图 7 不同加筋体刚度条件下复合地基沉降-荷载曲线
Fig. 7 The settlement-load curves of composite foundation varying under different stiffness of reinforced body

竖向荷载为 200 kPa 时不同加筋体刚度条件下复合地基外侧桩体的水平位移分布曲线如图 8 所示。随着加筋体刚度的增大, 各桩体在竖向上的水平位移分布规律基本保持不变, 但其位移值却会因受到加筋体约束作用的增强而不断减小。与无加筋体情况相比, 加筋碎石桩的最大水平位移分别减小了 29.1%、41.5%、46.7%, 这说明, 随着加筋体刚度的增大, 桩土间的相互作用将达到一个平衡, 此时, 再增大加筋体刚度, 对加筋碎石桩桩体水平位移影响不大。

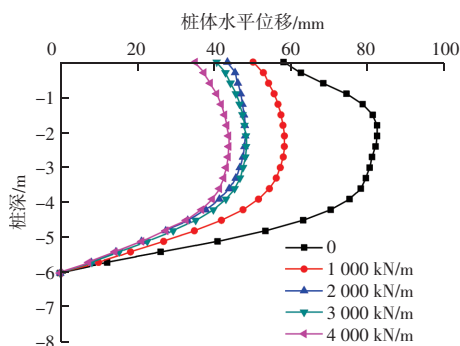


图 8 竖向荷载 200 kPa 时不同加筋体刚度条件下复合地基外侧桩体的水平位移分布曲线
Fig. 8 The horizontal displacement distribution curve of the outer pile of the composite foundation under different reinforcement stiffness under the vertical load of 200 kPa

2.4 不同桩体模量

不同桩体模量条件下复合地基的荷载-沉降曲线如图 9 所示。随着桩体模量的增大, 桩土相互作用增强, 桩间土承担上部荷载的比例逐渐降低, 导致复合地基最大沉降逐渐减小。复合地基最大沉降与桩体模量呈指数衰减关系, 即, 桩体模量达到一定值时, 复合地基桩土相互作用强度将保持稳定, 此时桩体模量的增加对复合地基沉降变化影响不大。

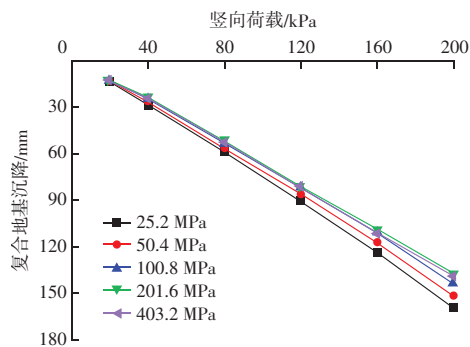


图 9 不同桩体模量条件下复合地基沉降-荷载曲线
Fig. 9 The settlement-load curves of composite foundation varying under different pile modulus conditions

图 10 给出了竖向荷载 200 kPa 时不同桩体模量条件下复合地基外侧桩体的水平位移分布曲线。随着桩体模量的增大, 由于复合地基中心桩体承担的荷载变大, 导致其在桩顶 4.5 m 范围内产生的水平位移 (主要为鼓肚变形) 因应力增加且周围应力约束强度相对较弱而逐渐增大, 桩顶 4.5 m 范围以下的水平位移则因周围应力约束强度较强而先增大后基本保持不变。由于复合地基外侧桩的水平位移以弯曲变形为主, 而桩体的弹性模量对抵抗弯曲变形具有

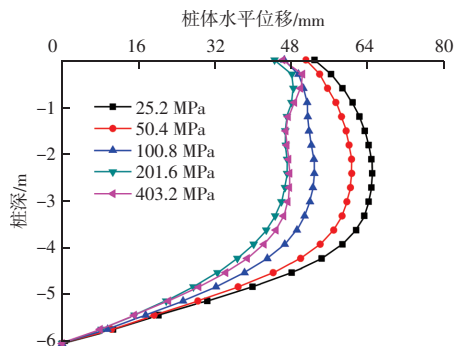


图 10 竖向荷载 200 kPa 时不同桩体模量条件下复合地基外侧桩体的水平位移分布曲线
Fig. 10 The horizontal displacement distribution curve of the outer pile of the composite foundation under pile modulus conditions under the vertical load of 200 kPa

岩土力学

重要作用，因此桩体模量越大，虽然外侧桩体受到的荷载也越大，但其弯曲水平位移却越小并最终趋于稳定。

2.5 不同垫层厚度

图 11 为不同垫层厚度条件下复合地基的荷载 - 沉降曲线。随着垫层厚度的增大，各桩体间的相互联系变得更加紧密，桩土差异沉降逐渐减小，复合地基最大沉降越来越低。复合地基沉降与垫层厚度呈指数衰减关系，当垫层厚度大于 0.5 m 时，随垫层厚度的增加，复合地基沉降变化就很小。

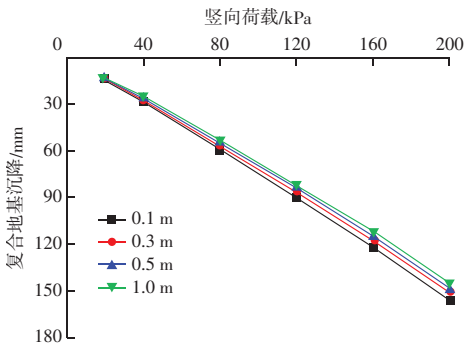


图 11 不同垫层厚度条件下复合地基沉降 - 荷载曲线
Fig. 11 The settlement-load curves of composite foundation under different cushion thickness conditions

竖向荷载 200 kPa 时不同垫层厚度条件下复合地基外侧桩体的水平位移分布曲线如图 12 所示。由于碎石垫层厚度的增加会导致各桩之间的联系变得更加精密，其变形协同作用增强，导致复合桩基外侧桩体承担的荷载比例增大，其水平位移逐渐增大，尤其是中上部桩体区域。

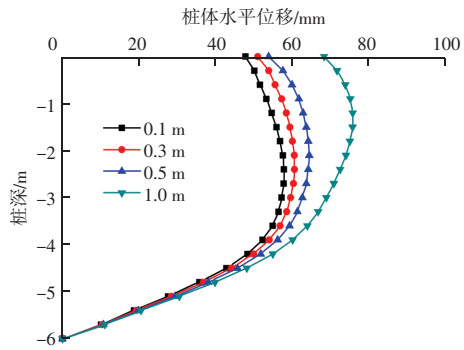


图 12 竖向荷载 200 kPa 时不同垫层厚度条件下复合地基外侧桩体的水平位移分布曲线
Fig. 12 The horizontal displacement distribution curve of the outer pile of the composite foundation under different cushion thickness under the vertical load of 200 kPa

3 结论

通过 FLAC 3D 软件对不同桩径、桩距与桩径比值、加筋体刚度、桩体模量以及垫层厚度 5 种因素条件下复合地基沉降以及桩体变形随竖向荷载的变化规律展开数值模拟分析，得到以下结论：

- (1) 随着桩径的减小，加筋碎石桩复合地基沉降会呈现线性减小的趋势，但同时工程造价将增加，因此，在实际工程设计中，应根据使用要求和经济水平来选择加筋碎石桩的桩径大小。
- (2) 复合地基最大沉降随桩距与桩径比值呈指数衰减式分布，当桩距与桩径比值大于 5 时，加筋碎石桩对复合地基承载力影响就基本可以忽略不计。
- (3) 加筋体刚度在由 0 增长至 2 000 kN/m 的过程中，加筋碎石桩复合地基沉降和桩体位移减小最为明显，从性价比的角度考虑，加筋碎石桩加筋体的整体刚度不宜超过 2 000 kN/m。
- (4) 复合地基最大沉降与桩体模量呈指数衰减关系，当桩体模量达到 201.6 MPa 时，加筋碎石桩复合地基承载力就基本保持稳定。
- (5) 加筋碎石桩复合地基沉降与垫层厚度呈指数衰减关系，当垫层厚度大于 0.5 m 时，复合地基沉降就基本不变。

参 考 文 献

[1] 钟久红. 公路工程软基加固碎石桩施工技术应用分析 [J]. 运输经理世界, 2023 (36): 35-37.
[2] 任佳丽, 龚泉, 胡胜刚, 等. 碎石桩红黏土复合地基承载力与变形特性分析 [J]. 水利与建筑工程学报, 2023, 21 (1): 160-165.
[3] 王超. 环向加筋碎石桩复合地基路堤稳定性分析 [J]. 河北水利电力学院学报, 2021, 31 (2): 17-22.
[4] 朱彦博, 陈树培, 石秀峰, 等. 考虑群桩效应的加筋碎石桩复合地基沉降比计算公式 [J]. 铁道建筑, 2020, 60 (2): 86-90.
[5] 谢忠勇, 李爱国. 土工加筋碎石桩在公路软基处理中的应用 [J]. 山西建筑, 2011, 37 (5): 145-147.
[6] 袁海清. 土工格栅加筋碎石桩复合地基稳定性计算分析 [J]. 公路工程, 2012, 37 (3): 95-98.
[7] 赵明华, 陈庆, 张玲, 等. 加筋碎石桩承载力计算 [J]. 公路交通科技, 2011, 28 (8): 7-12.
[8] 韩剑飞, 高明军, 丁选明, 等. 管式格栅加筋碎石桩的承载力影响因素分析 [J]. 土工基础, 2012, 26 (5): 54-57.

- 线安全评价及保护措施 [J]. 工程地质学报, 2018, 26 (4): 1043–1053.
- [8] 邵新军, 段鹏辉, 王磊. 基坑开挖对邻近管线变形影响及控制措施研究 [J]. 郑州大学学报 (工学版), 2020, 41 (5): 66–71.
- [9] 蒋真皓, 徐利锋. 基坑开挖对临近建筑和管线的变形影响分析及控制措施 [J]. 建筑结构, 2023, 53 (增刊 1): 2832–2836.
- [10] 邹森, 吴禄源, 王磊. 某地铁车站深基坑开挖对临近管线的影响分析 [J]. 铁道标准设计, 2016, 60 (3): 106–111.
- [11] 金伟, 柯磊, 胡方剑, 等. 深基坑开挖对近邻大直径管线的影响 [J]. 科学技术与工程, 2020, 20 (2): 790–796.
- [12] 王洪德, 肖杨. 深基坑开挖对邻近地理管线扰动影响分析 [J]. 辽宁工程技术大学学报 (自然科学版), 2018, 37 (5): 769–775.
- [13] 袁小平, 刘红岩, 吕淑然. 深基坑开挖对双层地下管线影响的有限元分析 [J]. 工业建筑, 2011, 41 (增刊 1): 771–775.
- [14] 张陈蓉, 俞剑, 黄茂松. 基坑开挖对邻近地下管线影响的变形控制标准 [J]. 岩土力学, 2012, 33 (7): 2027–2034.
- [15] 左殿军, 史林, 李铭铭, 等. 深基坑开挖对邻近地铁隧道影响数值计算分析 [J]. 岩土工程学报, 2014, 36 (增刊 2): 391–395.
- [16] VORSTER T E, KLAR A, SOGA K, et al. Estimating the effects of tunneling on existing pipelines [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, 131 (11): 1399–1410.
- [17] SHARMA J S, HEFNY A M, ZHAO J, et al. Effect of large excavation on deformation of adjacent MRT tunnels [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2001, 16 (2): 93–98.
- [18] CALVETTI F, DI P C, NOVA R. Experimental and numerical analysis of soil pipe interaction [J]. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 2004, 130 (12): 1292–1299.
- [19] YIMSIRI S, SOGA K, YOSHIZAKI K, et al. Lateral and upward soil–pipeline interactions in sand for deep embedment conditions [J]. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 2004, 130 (8): 830–842.
- [20] GUO P. Numerical modeling of pipe soil interaction under oblique loading [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, 131 (2): 260–268.
- (上接第 108 页)
- [9] 陈建峰, 李良勇, 徐超, 等. 套筒长度对加筋碎石桩复合地基路堤变形和稳定性的影响 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2019, 50 (7): 1662–1669.
- [10] 李丽华, 曹毓, 刘巨强, 等. 不同加筋方式下碎石桩复合地基承载性能试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42 (12): 3085–3094.
- [11] 黄世斌, 邹辰皓, 王家全, 等. 基于离散–连续耦合的加筋包裹碎石桩承载机理分析 [J]. 广西大学学报 (自然科学版), 2022, 47 (1): 13–21.
- [12] GAO J, ZHANG Y, WANG C, et al. Behavior characteristics of geosynthetic–encased stone column under cyclic loading [J]. Transportation Geotechnics, 2021, 28: 100554.
- [13] ZHANG X, YOO C, CHEN J F, et al. Numerical modeling of floating geosynthetic–encased stone column supported embankments with basal reinforcement [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2022, 50 (4): 720–736.
- [14] 王家全, 常志凯, 林志南, 等. 土工格栅包裹碎石桩力学特性数值模拟分析 [J]. 公路, 2021, 66 (8): 7–12.
- [15] 郭跃飞, 章本本, 罗正东, 等. 竹筋格栅套筒加筋碎石桩极限承载力计算 [J]. 公路, 2023, 68 (10): 111–117.
- [16] LEE D Y, YOO C, PARK S, et al. Field load tests of geogrid encased stone columns in soft ground [C]. Proceedings of the Eighteenth International Offshore and Polar Engineering Conference. California: International society of Offshore and Polar Engineers, 2008, 2: 521–524.