

循环荷载下筋箍碎石桩复合地基动力特性数值分析

袁涌筌, 赵明华, 杨超炜[†], 肖尧
(湖南大学 岩土工程研究所, 湖南 长沙 410082)

摘要:通过7组三维有限差分数值模拟试验,研究了循环荷载作用下筋箍碎石桩复合地基的动力特性,着重分析了4个重要参数对其性能的影响,并将数值计算结果与室内模型试验结果进行了对比分析,验证了数值计算结果的合理性.结果表明,在循环荷载作用下,筋箍碎石桩复合地基的应力和沉降变化具有明显的动力特性.相同循环加载条件下,增大碎石密度可有效提高碎石桩的承载力.筋材使碎石桩的力学性能得到了改善,不同长度的加筋会对碎石桩产生明显不同的效果,在一定范围内增加碎石桩的加筋长度可以有效提高碎石桩的承载力.筋材对复合地基顶部的累积沉降和应力集中率有显著影响.筋材能提高碎石桩的整体性,加筋长度越长的碎石桩的振动协调性越好.桩径对筋箍碎石桩复合地基顶部累积沉降的影响比较明显,碎石桩的最佳 L/d 值为8/3.数值计算结果与室内模型试验结果拟合较好,沉降值最大相差7%,桩侧应力值最大相差9%.

关键词:复合地基;碎石桩;筋材;加筋长度;碎石密度;循环荷载;数值模拟试验

中图分类号:TU443.15

文献标志码:A

Numerical Analyses on Dynamic Characteristics of Composite Foundations with Encased Stone Piles under Cyclic Loading

YUAN Yongquan, ZHAO Minghua, YANG Chaowei[†], XIAO Yao
(Geotechnical Institute of Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: In this study, seven groups of three-dimensional finite differential numerical simulation tests were performed to investigate the dynamic characteristics of the composite foundations of geogrid-encased piles under cyclic loading. The effects of four important parameters on the behavior of the encased piles were evaluated. The numerical calculation results are compared with those of laboratory model tests, which verifies the rationality of the numerical results. The results show that the stress and settlement of encased stone piles composite foundations have obvious dynamic characteristics under cyclic loading. Under the same cyclic loading condition, increasing the gravel density could effectively improve the bearing capacity of the piles. The encasement can improve the mechanical properties of the piles, and the encasements with different lengths have different effects on the piles. Increasing the encasement length in a certain range can effectively improve the bearing capacity of the stone piles. The encasement has a significant effect on the cumulative settlement and stress concentration at the top of composite foundations. The encasement can improve the integrity of the stone piles, and increasing reinforcement length can lead to better vibration coordination of the stone piles. Pile diameter has an obvious influence on the cumulative settlement at the top of

* 收稿日期:2021-10-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51478178), National Natural Science Foundation of China(51478178)

作者简介:袁涌筌(1988—),男,湖南长沙人,湖南大学博士研究生

[†] 通信联系人, E-mail: cwyang@hnu.edu.cn

encased stone pile composite foundations, and the optimal L/d value of the stone pile is $8/3$. The results of numerical calculation fit well with those of laboratory model tests. The maximum difference in settlement value is 7%, and the maximum difference in lateral stress of the pile is 9%.

Key words: composite foundation; stone piles; geogrid; encasement length; gravel density; cyclic loading; numerical simulation tests

碎石桩能快速消散超孔压,降低传递到软土地基上的荷载水平,对提高软土地基的承载能力是有效、可行和经济的。1989年, Van^[1]首次提出用土工材料围护结构来提高碎石桩的承载能力,在过去的30多年,土工材料围护碎石桩的研究取得了很大的进展。筋箍碎石桩旨在通过使用土工合成材料,给碎石桩提供侧向约束力,从而提高碎石桩在复合地基中的承载力。针对筋箍碎石桩的力学性能,有许多学者进行了相关的研究。

在理论研究与试验研究方面, Tognon 等^[2]使用直接剪切仪检测了不同配置的未润滑和润滑土工材料处理的有效性,旨在减少桩-土界面之间的边界摩擦。Gniel 等^[3]讨论了一系列小尺度模型桩试验的结果,研究了土工格栅包围桩的行为,重点研究了改变封闭长度的影响和部分封闭土工格栅的桩是否会与完全封闭的桩表现相似。张玲等^[4]将筋箍碎石桩单桩的受力变形视为空间轴对称问题,基于辛体系理论构建了可考虑桩体横截面剪应力的辛对偶方程,并对方程进行变量分离,再结合边界条件得到了筋箍碎石桩沉降及径向变形的辛体系解答。谭鑫等^[5]基于弹塑性介质中圆孔扩张理论推导了考虑桩体鼓胀变形及桩周土体刚度的碎石桩单桩承载力计算公式,并通过对比数值解验证了推导公式的有效性,较为系统地研究了软土地基中碎石桩单桩的承载机理及破坏模式。赵明华等^[6]假设桩土等应变且均为线弹性材料,选取单桩有效加固单元整体作为分析对象,其中碎石桩同时受到加筋材料和土环的约束作用,而土环则可以考虑为同时受到单桩有效加固范围外土体的静止土压力和内部碎石桩鼓胀压力共同作用的厚壁圆筒,再结合广义胡克定律得到应力应变关系,进而导出了筋箍碎石桩复合地基沉降计算的新方法。Nasiri 等^[7]采用小尺度试验(SSE)和三维有限差分法(3DFDM)进行了一系列室内模型试验,研究了筋箍碎石桩在砂质边坡稳定中的作用。Chen 等^[8]进行了一系列普通碎石桩的大型三轴试验和筋箍碎石桩的单轴试验,碎石桩直径 300 mm,高度 600 mm,试验采用 5 种类型的筋材,研究了初始孔隙率和

包覆材料对碎石桩单轴压缩性能的影响。赵明华等^[9]基于柔性桩-桩承式路堤的变形机理,提出了路堤-桩-土协调变形的双等沉面荷载传递模型。

在数值研究方面, Yoo^[10]给出了在软土地基里布置筋箍碎石桩的路堤沉降特性的数值研究结果。Almeida 等^[11]采用二维有限元分析方法,对软土地基中碎石桩在路堤荷载作用下的受力特性进行了数值模拟,然后,通过改变软土层的厚度和土工合成材料的抗拉刚度进行参数研究。谭鑫等^[12]采用数值方法模拟土工织物包裹碎石桩的单轴与三轴压缩试验。通过对比试验数据验证数值模型的合理性,并在此基础上,分析土工织物模量、抗拉强度和围压对包裹碎石桩力学特性的影响,揭示包裹碎石桩体变形承载及破坏机制。夏博洋等^[13]通过有限元数值模拟与模型试验对比分析,验证了数值模型的可靠性,进而变换加筋长度,研究分析了复合基础下端承加筋单桩与群桩的极限承载能力和破坏模式。Gu 等^[14]采用三维离散单元法分析了筋箍碎石桩单桩在无侧限压缩下的受力特性。Indraratna 等^[15]采用一种新型轨道过程模拟装置,研究了土工格室稳定路基在循环荷载作用下的荷载-变形行为,并在平面应变条件下,采用离散元法模拟土工格室加筋土压载。Fattah 等^[16]利用有限元方法对不同条件下的桩-土系统进行了分析。

上述研究均是关于静力条件下的筋箍碎石桩复合地基的,但在实际工程中,筋箍碎石桩复合地基处于动力条件下的情况居多,因而研究其动力特性具有重要的意义。本文通过 7 组三维有限差分数值模拟试验,研究了循环荷载下筋箍碎石桩复合地基的动力特性,着重分析了 4 个重要参数对筋箍碎石桩性能的影响。

1 室内模型试验

图 1(a)显示了筋箍碎石桩复合地基试验的加载设备,图 1(b)显示了 4 个直径为 100 mm 的圆柱形土工格栅与 4 根 PC 管。将碎石骨料灌注到土工格栅

内,形成筋箍碎石桩,桩长为 800 mm,与周围的软土一起被填筑在模型箱内.施工完成后,测得碎石桩的相对密度为 67%.在图 1(a)所示的加载设备下进行不同循环荷载比的竖向动荷载试验.在本次试验中,动态负载的加载频率约为 3 Hz,相应的数据采样频率设置为 50 Hz, N 为循环次数.循环荷载类型为半正弦波荷载.

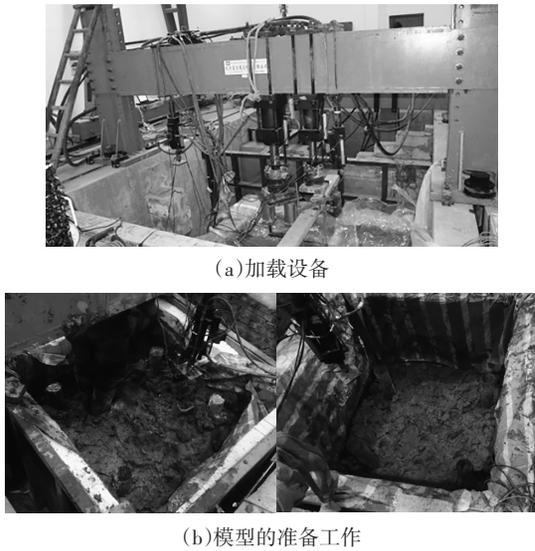


图 1 复合地基荷载试验

试验采用由高密度聚乙烯(HDPE)制成的双向土工格栅进行碎石桩加固,土工格栅的强度和几何性能见表 1.格栅套筒的制备方法是切割 HDPE,并将其制成直径为 100 mm 的圆柱形套筒,其长度为 400 mm.图 2 为土工格栅封装的图片.

表 1 双向土工格栅的性质

Tab.1 Properties of the biaxial geogrid

伸长率为 2% 的抗拉强度/($kN \cdot m^{-1}$)	伸长率为 5% 的抗拉强度/($kN \cdot m^{-1}$)	肋条宽度/mm	孔洞尺寸/($mm \times mm$)
17.6	23.7	4	8×8

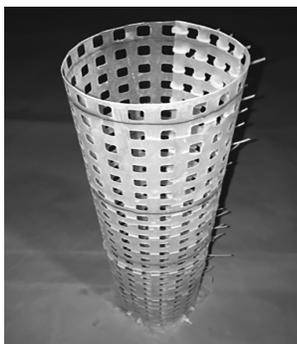


图 2 土工格栅图片

Fig.2 Typical photograph of the geogrid encasement

软土取自湖南长沙市湘江河底,原位土体的含水率为 30% ~ 60%,不排水抗剪强度在 15 kPa 以下.由于超软土太软,不能进行板载试验,因此采用不固结不排水(UU)三轴试验估算超软土的不排水抗剪强度,进行三组试验,并取平均值.三轴试验的土样是用直径为 50 mm、高度为 100 mm 的取样管制作的,将土样从管中挤出,并小心裁剪成所需的尺寸(直径为 38 mm,高度为 76 mm),以减少干扰.图 3 所示为软土三轴试验抗剪强度包络线图,软土的详细性质列于表 2.

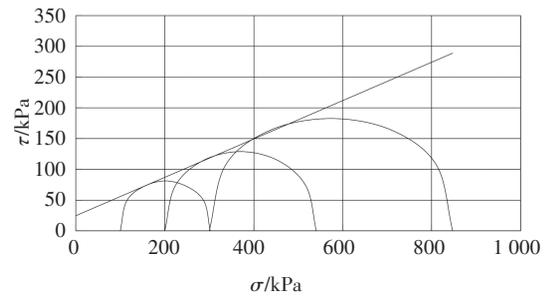


图 3 软土三轴试验抗剪强度包络线图

Fig.3 Triaxial shear strength envelope diagram of soft soil

表 2 软土的性质

Tab.2 Properties of the clay soils

粒径范围/mm	D_{10}, D_{30}, D_{60} /mm	内摩擦角/($^{\circ}$)	干密度/($g \cdot cm^{-3}$)	相对密度/%
0.5~20	2, 7 和 15	43.23	2.52	67

图 4 为碎石的粒径分布,碎石的性能如表 3 所示(D_{10} 表示质量分数小于等于 10% 对应的最大碎石粒径).

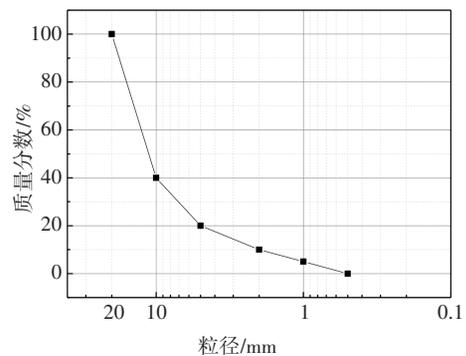


图 4 碎石粒径分布

Fig.4 Stone particle size distribution

表 3 碎石的性质

Tab.3 Properties of aggregates

液限/%	塑限/%	塑性指数/%	土的含水率/%	土的不排水抗剪强度/kPa	内摩擦角/($^{\circ}$)
64.6	35.2	29.4	42.5	4.7	17.71

2 三维有限差分数值模拟

2.1 三维有限差分模型

有限差分方法(Finite Difference Method)是一种求偏微分(或常微分)方程和方程组定解问题的数值解的方法,简称差分方法.其基本思想是把连续的定解区域用有限个离散点构成的网格来代替,这些离散点称作网格的节点.把连续定解区域上的连续变量的函数用在网格上定义的离散变量函数来近似,把原方程和定解条件中的微商用差商来近似,积分用积分和来近似,于是原微分方程和定解条件就近似地代之以代数方程组,即有限差分方程组.解此方程组就可以得到原问题在离散点上的近似解,然后再利用插值方法便可以从离散解得到定解问题在整个区域上的近似解.

图 5 是一个典型的长度为 0.7 m、宽度为 0.7 m、高度为 1 m 的有限差分模型.桩长 $L=0.8$ m,直径 $d=0.1$ m,该模型以实际工程为原型,按照几何相似比为 5:1 建立的缩尺模型,与前文模型试验参数一致.为了减少模型边界上的波的反射,将模型的边界条件设置为自由场边界.土工格栅结构单元模拟为薄膜单元.桩的加筋长度为 0.4 m 和 0.8 m.为了模拟交通荷载的特性,采用连续的半正弦加载曲线作为动态加载曲线,如图 6 所示,其中荷载幅值 P_{\max} 为 66.88 kPa^[17],在数值模拟中,只考虑了竖向荷载.数



图 5 三维有限差分模型

Fig.5 Three-dimensional finite differential model

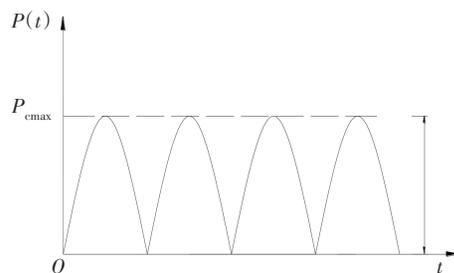


图 6 动力荷载曲线

Fig.6 Dynamic loading curve

值模型的参数和材料参考了之前的模型试验^[18].

2.2 参数分析

本文在前人研究的基础上,对筋箍碎石桩的性能进行了参数化研究,确定了 4 个重要因素:1)加筋长度;2)桩径;3)桩长;4)碎石密度^[12-13,15-16].这 4 个因素在各组数值模型中的数值是不同的.

2.3 本构模型选取

本构模型,又称材料的力学本构方程,或材料的应力-应变模型,是描述材料力学特性(应力-应变-强度-时间关系)的数学表达式.

在数值计算中,软土地基和碎石桩采用 Mohr-Coulomb (MC)本构模型(一种理想弹塑性模型,它综合了胡克定律和库伦破坏准则.有 5 个参数,即控制弹性行为的 2 个参数:弹性模量和泊松比,以及控制塑性行为的 3 个参数:有效黏聚力、有效内摩擦角和剪胀角.其采用了弹塑性理论,能较好地描述材料的破坏行为),筋材采用具有恒定刚度的线弹性模型(即广义胡克定律)表示,碎石桩的性质如表 4 所示.循环荷载比为 0.3 的室内模型试验与数值模型 3 的参数是一致的,可以互相验证,本文的第 3 节将进行数值模型试验结果和室内模型试验结果的对比分析.

在所有数值模型中,软土的体积模量均为 7.72×10^3 kPa,剪切模量为 3.46×10^3 kPa,黏聚力为 14.7 kPa,内摩擦角为 17.71° ,密度为 1280 kg/m^3 .土工格栅的刚度均为 19.8 kN/m,厚度均为 2 mm,密度为 920

表 4 碎石桩的性质

Tab.4 Properties of the stone column

属性	体积模量/kPa	剪切模量/kPa	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	加筋长度/m	桩长/m	桩径/m	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
模型 1	8.33E+06	3.85E+06	0	43.23	0.4	0.8	0.1	1 550
模型 2	8.33E+06	3.85E+06	0	43.23	0.4	0.8	0.1	1 650
模型 3	8.33E+06	3.85E+06	0	43.23	0.4	0.8	0.1	1 600
模型 4	8.33E+06	3.85E+06	0	43.23	0.8	0.8	0.1	1 550
模型 5	8.33E+06	3.85E+06	0	43.23	0.4	0.8	0.2	1 550
模型 6	8.33E+06	3.85E+06	0	43.23	0.4	0.8	0.3	1 550
模型 7	8.33E+06	3.85E+06	0	43.23	0.4	0.4	0.1	1 550

kg/m³. 格栅与桩周土接触面的法向刚度为 1.7×10⁸ kN/m, 剪切刚度为 1.1×10³ kN/m; 格栅与碎石桩接触面的法向刚度为 3.2×10⁸ kN/m, 剪切刚度为 3×10³ kN/m.

3 数值计算结果与室内模型试验结果的比较

3.1 复合地基顶部累积沉降

数值计算与室内模型试验的复合地基顶部累积沉降曲线如图 7 所示. 从图 7 中可以看出, 两条曲线均呈上升抛物线形式, 沉降值最大相差 7%, 因此, 数值计算结果与室内模型试验结果吻合较好.

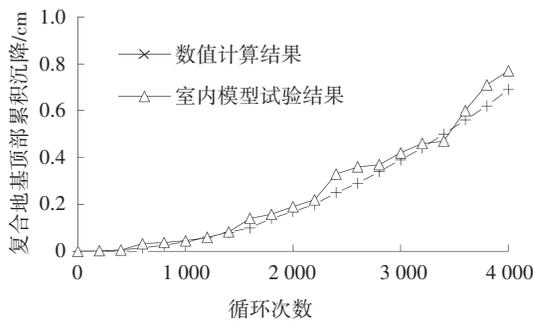


图 7 数值计算与室内模型试验的复合地基顶部累积沉降曲线

Fig.7 Cumulative settlement curves at the top of composite foundations of numerical calculation and interior model test

3.2 桩侧应力

图 8 所示为数值计算与室内模型试验的桩侧应力曲线. 如图 8 所示, 两条曲线都表现了振荡的形状, 桩侧应力值最大相差 9%, 表明数值计算结果与室内模型试验结果的拟合效果较好.

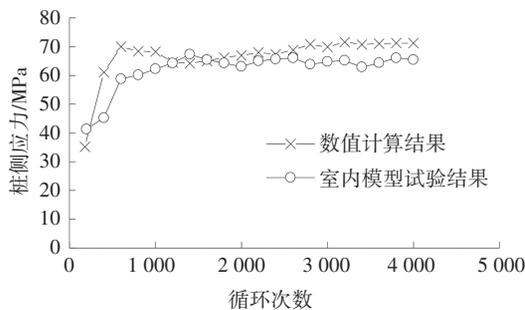


图 8 数值计算与室内模型试验的桩侧应力曲线
Fig.8 Lateral stress curves of columns of numerical calculation and interior model test

4 数值计算结果分析

4.1 碎石密度的影响

通过对比模型 1、模型 2 和模型 3, 分析了碎石密

度对复合地基中筋箍碎石桩受力性能的影响. 图 9 所示为不同碎石密度条件下筋箍碎石桩的侧向应力曲线, 由图 9 可以看出, 当循环次数在 500 次之前时, 侧应力迅速增大并达到一阶段峰值, 说明桩中的碎石被压实, 荷载由碎石桩顶部向底部传递. 达到阶段峰值后, 桩侧应力随循环次数的增加而波动, 说明桩侧应力的变化已处于相对稳定状态. 模型 1、模型 2、模型 3 中侧应力的稳定值分别为 67.12 kPa、72.21 kPa、70.43 kPa. 模型 3 和模型 2 的桩侧向应力较模型 1 分别增加了 5% 和 8%. 由此可以得出, 碎石密度大的碎石桩比碎石密度小的刚度大, 从而碎石密度更大的碎石桩承受的荷载更大. 碎石的密度对桩侧应力的影响是比较明显的.

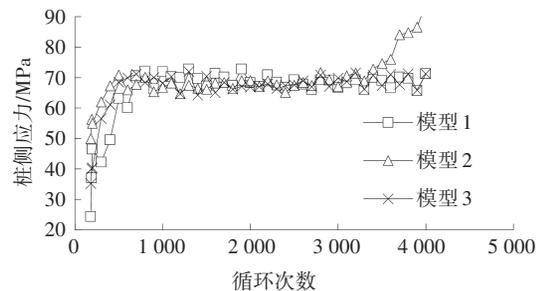


图 9 不同碎石密度条件下筋箍碎石桩的侧向应力曲线
Fig.9 Lateral stress curves of encased stone columns with different gravel densities

图 10 所示为不同碎石密度条件下复合地基顶部沉降的示意图. 由图 10 可知, 复合地基顶部累积沉降随着循环次数的增加而增加, 曲线以类似抛物线的方式随着斜率的增加而增加, 说明复合地基中颗粒受到挤压, 颗粒间孔隙随循环次数的增加而减小, 循环振动使颗粒不断重新排列. 模型 1、模型 2 和模型 3 中的沉降峰值分别为 1.72 cm、0.37 cm 和 0.69 cm, 模型 1 中的沉降分别是模型 2 和模型 3 的 4.65 倍和 2.49 倍, 碎石密度越小的复合地基累积沉降量越大. 因此, 碎石密度对复合地基的累积沉降有不可忽视的影响.

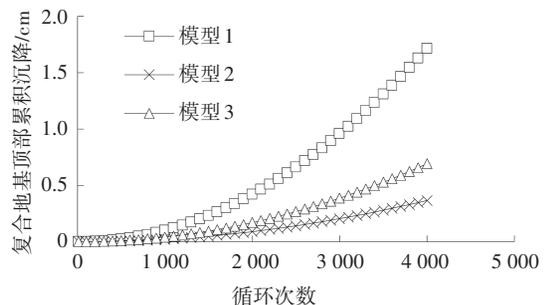


图 10 不同碎石密度条件下复合地基顶部沉降示意图
Fig.10 Diagram of settlements at the top of composite foundations with different gravel densities of the composite foundations

图 11 所示为模型 1 中碎石桩桩身在不同深度的应变增量曲线,应变增量可以反映出桩体的鼓胀变形.由图 11 可以看出,在距离碎石桩顶部深度 0.1 m 和 0.2 m 处,应变增量在早期循环中持续增加,分别为 0.07 和 0.14,在后续循环中的变化开始趋于稳定.在距离碎石桩顶部深度 0.4 m 处,应变增量在整个循环过程中不断增大.在循环初期,桩体加筋段的应变增量明显大于其非加筋段的应变增量.但随着循环次数的增加,非加筋段的应变增量迅速发展,并超过了加筋段的应变增量.结果表明筋材能够提供给桩体足够的侧向约束,有效控制桩体的鼓胀变形.

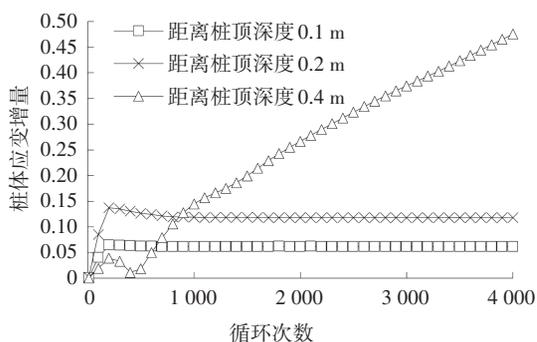


图 11 模型 1 中碎石桩桩身不同深度的应变增量曲线
Fig.11 Strain increment of stone column at different depths in model 1

4.2 桩体加筋长度的影响

通过比较模型 1 和模型 4,分析了加筋长度对复合地基中碎石桩受力性能的影响.图 12 分别是加筋长度为 0.4 m 和 0.8 m 的碎石桩侧应力曲线.从图 12 可以看出,在循环剪切的初始阶段,桩侧应力迅速增加并达到峰值,意味着初始阶段的循环剪切作用将引起界面土和碎石的剪切收缩,从而使桩-土界面横向应力增加.当桩侧应力开始在一定范围内波动后,复合地基即达到相对稳定状态.模型 1 和模型 4 中的侧应力峰值分别为 67.12 kPa 和 75.93 kPa,模型 4 中的侧向应力较模型 1 增加了 13%.由此可以得出,桩体加筋长度越长,桩体刚度越大,其承受的荷载也越大.且模型 4 中的侧应力的波动幅值大于模型 1,说明筋材能提高碎石桩的整体性,加筋长度越长的碎石桩的振动协调性越好.加筋长度对桩侧应力的影响比较明显.

碎石桩加筋长度对复合地基累积沉降性能的影响如图 13 所示.由图 13 可以看出,随着循环次数的增加,复合地基顶部累积沉降呈现出非线性单调递增的趋势.此现象表示在循环剪切作用下,复合地基

中的土颗粒和碎石不断密实,孔隙减少.模型 1 和模型 4 中的沉降峰值分别为 1.72 cm 和 0.52 cm,模型 1 中的沉降量是模型 4 的 3.3 倍,因此碎石桩的加筋长度对复合地基的累积沉降有显著影响.由此可知,筋材使碎石桩的性能得到了改善.

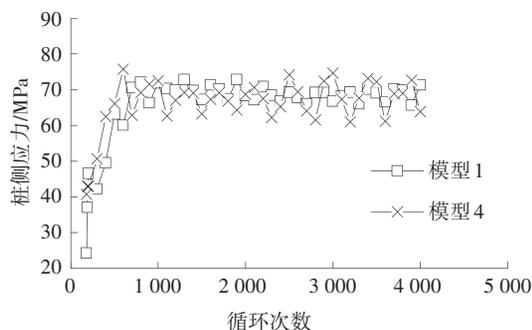


图 12 不同加筋长度条件下碎石桩侧应力曲线
Fig.12 Lateral stress curves of stone columns with different encased lengths

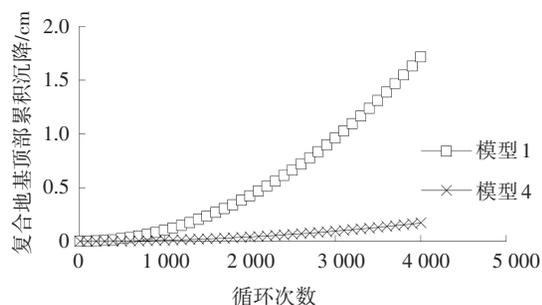


图 13 不同加筋长度条件下复合地基顶部沉降示意图
Fig.13 Diagram of settlements at the top of composite foundations with different encased lengths

碎石桩在不同加筋长度条件下的复合地基顶部应力集中率曲线如图 14 所示(应力集中率为桩土应力比).从图 14 可以看出,应力集中率在早期循环加载中有所增加,但在后续循环加载中略有下降.原因是在加载初期,碎石桩具有相对较大的刚度,从而桩体分担了大部分循环荷载.随着循环次数的增加,桩周土体逐渐被压缩,其刚度也随之增加,进而部分循环荷载转移到了桩周土体.因此,应力集中率也逐渐减小,并趋于稳定.这一现象已经参考了之前实际工程、模型试验和软土地基数值模拟中的情况^[19].筋材可以改善碎石桩的荷载传递特性,不仅可以提高碎石桩的承载力和刚度,还可以有效地将桩体上部荷载传递给桩底部较好的土层.在循环加载过程结束时,模型 1 和模型 4 中的应力集中率分别为 6.34 和 6.86,模型 4 的应力集中率比模型 1 增加了 8%,研究表明,碎石桩加筋长度对复合地基顶部应力集中率

的影响较为明显. 碎石桩的加筋长度越长, 对应的复合地基的应力集中率越大.

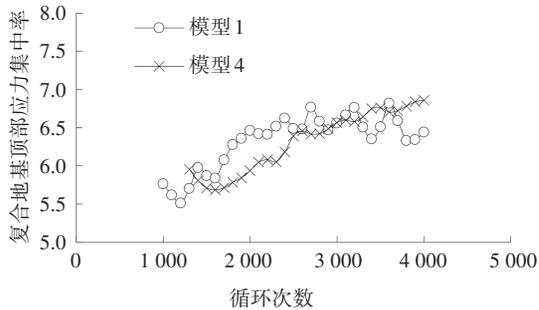


图14 不同加筋长度条件下复合地基顶部应力集中率曲线

Fig.14 Stress concentration ratio curves at the top of composite foundations with different encased lengths

4.3 桩长的影响

通过比较模型1和模型7, 分析了桩长对复合地基中碎石桩性能的影响. 桩长对复合地基累积沉降的影响如图15所示, 从图15中可以看出, 累积沉降随循环次数的变化趋势是类似随坡度上升的抛物线形式. 这一趋势意味着复合地基内部发生了剧烈的变化, 颗粒在复合地基中连续嵌入挤压, 压实程度越来越高. 如图15所示, 由于两条曲线相距较远, 因此桩长度对复合地基累积沉降的影响较大. 模型1和模型7中最大沉降分别为1.72 cm和0.16 cm, 模型1中的沉降是模型7的10.75倍. 在相同的循环加载条件下, 较短碎石桩的刚度较大, 且对应的复合地基的累积沉降量较小.

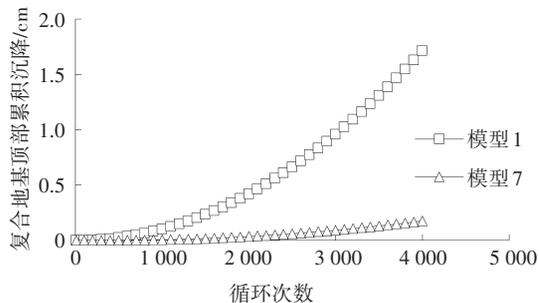


图15 不同桩长条件下复合地基顶部沉降示意图

Fig.15 Diagram of settlements at the top of composite foundations with different column lengths

4.4 桩径的影响

通过对比模型1、模型5和模型6, 分析了桩径对复合地基中碎石桩性能的影响. 图16所示为不同桩径条件下复合地基顶部累积沉降曲线. 从图16中可以看出, 累积沉降的变化趋势与其他试验组基本相同, 呈现出类似抛物线的形式, 且曲线斜率呈上升趋势.

模型1、模型5和模型6中的沉降峰值分别为1.72 cm、0.37 cm和0.12 cm. 模型1中的沉降分别是模型5和模型6的4.65和14.33倍. 由此可得出, 桩径越大的桩体刚度越大, 从而循环荷载下的复合地基累积沉降较小. 从沉降差异的倍数可以看出, 桩径对复合地基累积沉降的影响是比较明显的, 且桩体的最佳 L/d 值为 $8/3$ (模型6).

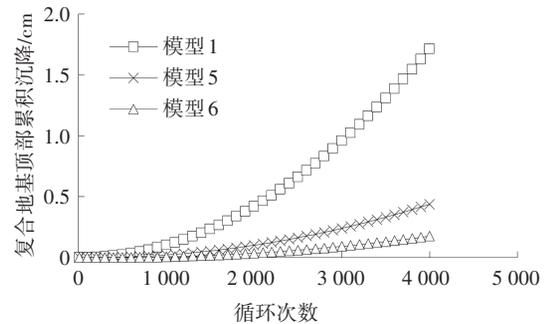


图16 不同桩径条件下复合地基顶部沉降示意图

Fig.16 Diagram of settlements at the top of composite foundations with different column diameters

5 结论

本文通过数值模拟试验, 研究了循环荷载下筋箍碎石桩复合地基的沉降和应力特性, 并得出以下结论.

1) 在循环荷载作用下, 筋箍碎石桩复合地基的应力和沉降变化表现出明显的动力特性. 增大碎石密度可以有效提高碎石桩的承载力; 越短的碎石桩刚度越大, 其承受的荷载也越大, 从而使其周围土体承受的荷载越小.

2) 筋材使碎石桩的力学性能得到了改善, 不同长度的加筋会对碎石桩产生明显不同的效果, 在一定范围内增加碎石桩的加筋长度可以有效提高碎石桩的承载力. 筋材对复合地基顶部的累积沉降和应力集中率有显著影响. 筋材能提高碎石桩的整体性, 加筋长度越长的碎石桩的振动协调性越好.

3) 桩径对筋箍碎石桩复合地基累积沉降的影响比较明显, 通过不同桩径的模型间的对比分析得出, 碎石桩的最佳 L/d 值为 $8/3$.

4) 数值计算结果与室内模型试验结果的拟合效果较好, 从而验证了数值模型的合理性.

参考文献

- [1] VAN IMPE W F. Soil improvement techniques and their evolution

- [M]. Rotterdam, Netherlands: Balkema, 1989: 63–66.
- [2] TOGNON A R, ROWE R K, BRACHMAN R W I. Evaluation of side wall friction for a buried pipe testing facility [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 1999, 17(4): 193–212.
- [3] GNIEL J, BOUAZZA A. Improvement of soft soils using geogrid encased stone columns [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2009, 27(3): 167–175.
- [4] 张玲, 张旭波, 徐泽宇, 等. 基于辛体系的筋箍碎石桩受力变形分析 [J]. *岩土工程学报*, 2020, 42(11): 2040–2049.
ZHANG L, ZHANG X B, XU Z Y, *et al.* Stress and deformation analysis of geosynthetic-encased stone columns based on symplectic system [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2020, 42(11): 2040–2049. (In Chinese)
- [5] 谭鑫, 冯龙健, 胡政博, 等. 竖向荷载下软土中碎石单桩破坏模式及承载力计算 [J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2021, 48(9): 10–19.
TAN X, FENG L J, HU Z B, *et al.* Failure mode and calculation method of ultimate bearing capacity of a single stone column in soft soil under vertical loading [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2021, 48(9): 10–19. (In Chinese)
- [6] 赵明华, 马思齐, 肖尧, 等. 基于厚壁圆筒模型的筋箍碎石桩沉降计算 [J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2019, 46(1): 101–108.
ZHAO M H, MA S Q, XIAO Y, *et al.* Settlement calculation of geogrid-encased stone columns based on thick-walled cylinder model [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2019, 46(1): 101–108. (In Chinese)
- [7] NASIRI M, HAJIAZIZI M. An experimental and numerical investigation of reinforced slope using geotextile encased stone column [J]. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 2021, 15(5): 543–552.
- [8] CHEN J F, WANG X T, XUE J F, *et al.* Uniaxial compression behavior of geotextile encased stone columns [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2018, 46(3): 277–283.
- [9] 赵明华, 张承富, 刘长捷. 基于双等沉面的柔性桩承式路堤荷载-沉降分析 [J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2021, 48(1): 1–9.
ZHAO M H, ZHANG C F, LIU C J. Load and settlement analysis of flexible-pile supported embankment based on double equal settlement plane [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2021, 48(1): 1–9. (In Chinese)
- [10] YOO C. Settlement behavior of embankment on geosynthetic-encased stone column installed soft ground—A numerical investigation [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2015, 43(6): 484–492.
- [11] ALMEIDA M S S, HOSSEINPOUR I, RICCIO M. Performance of a geosynthetic-encased column (GEC) in soft ground: numerical and analytical studies [J]. *Geosynthetics International*, 2013, 20(4): 252–262.
- [12] 谭鑫, 曹明, 冯龙健, 等. 土工织物包裹碎石桩力学特性的数值模拟研究 [J]. *中国公路学报*, 2020, 33(9): 136–145.
TAN X, CAO M, FENG L J, *et al.* Numerical study on mechanical behaviors of geotextile-wrapped stone column [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2020, 33(9): 136–145. (In Chinese)
- [13] 夏博洋, 郑刚, 周海祚, 等. 筋箍长度及刚度对加筋碎石桩复合地基承载力影响分析 [J]. *岩土工程学报*, 2019, 41(S2): 209–212.
XIA B Y, ZHENG G, ZHOU H Z, *et al.* Influences of length and strength of geosynthetics on bearing capacity of composite foundation with stone columns [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2019, 41(S2): 209–212. (In Chinese)
- [14] GU M X, HAN J, ZHAO M H. Three-dimensional discrete-element method analysis of stresses and deformations of a single geogrid-encased stone column [J]. *International Journal of Geomechanics*, 2017, 17(9): 04017070.
- [15] INDRARATNA B, NGO N T, RUJIKIATKAMJORN C, *et al.* Coupled discrete element-finite difference method for analysing the load-deformation behaviour of a single stone column in soft soil [J]. *Computers and Geotechnics*, 2015, 63: 267–278.
- [16] FATTAH M Y, MAJEED Q G. Finite element analysis of geogrid encased stone columns [J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2012, 30(4): 713–726.
- [17] 黄雨, 柏炯, 周国鸣, 等. 单向循环荷载作用下饱和砂土中单桩沉降模型试验研究 [J]. *岩土工程学报*, 2009, 31(9): 1440–1444.
HUANG Y, BAI J, ZHOU G M, *et al.* Model tests on settlement of a single pile in saturated sand under unilateral cyclic loading [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2009, 31(9): 1440–1444. (In Chinese)
- [18] GU M, ZHAO M, ZHANG L, *et al.* Effects of geogrid encasement on lateral and vertical deformations of stone columns in model tests [J]. *Geosynthetics International*, 2016, 23(2): 100–112.
- [19] CHEN J, TONG Z, LIU J. Numerical analysis of composite foundation of geosynthetic-encasement stone columns subjected to vertical loading [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 32(S2): 393–399.