

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2022.140



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



# 软土地基中包裹碎石桩地震动力响应数值模拟研究

王嘉鑫, 纪明昌, 郑俊杰, 郑焯炜  
(武汉大学土木建筑工程学院, 武汉 430072)

**摘要:**包裹碎石桩是将碎石桩包裹在土工合成材料中,通过土工合成材料的径向约束作用,减少碎石桩的变形,提高其在软土地基中的稳定性。使用有限差分程序FLAC3D进行模拟,研究地震荷载作用下软土地基中包裹碎石桩的动力响应。数值模型采用考虑滞回特性的非线性弹塑性模型模拟碎石桩和软土,使用线弹性土工格栅单元模拟土工合成材料。利用振动台试验结果验证三维动力数值模型,然后开展参数分析,研究筋材刚度、软土剪切模量、路堤荷载等参数对软土地基中包裹碎石桩地震动力响应的影响规律。数值模拟结果表明:随着筋材刚度的增加、软土剪切模量的增加、竖向荷载的减小,碎石桩的沉降及筋材应变和土体的剪应变也显著减小,土工合成材料包裹筋材可以有效提高碎石桩的抗震性能。

**关键词:**土工合成材料;碎石桩;包裹碎石桩;地震动力响应;软土地基

**中图分类号:**TU473.1 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2023)05-0058-08

## Numerical study on seismic response of geosynthetic encased stone column in soft clay foundation

WANG Jiaxin, JI Mingchang, ZHENG Junjie, ZHENG Yewei

(School of Civil Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, P. R. China)

**Abstract:** Geosynthetic can be used as an encasement for conventional stone column, forming geosynthetic encased stone column (GESC). This method can reduce the lateral displacements of stone column and improve the bearing capacity in soft clay through the radial restraint of geosynthetic encasement. This paper presents a numerical study to investigate the dynamic response of GESC in soft clay foundation. Both the stone column and the soft clay were characterized using nonlinear elasto-plastic models that consider the hysteretic behavior. Geosynthetic encasement was characterized using linearly elastic geogrid elements. The 3D dynamic numerical model was validated using shaking table test results published. A parametric study was conducted to investigate the influences of geosynthetic encasement stiffness, soft clay shear modulus, and embankment loading on the dynamic response of GESC in soft

**收稿日期:**2022-08-24

**基金项目:**国家自然科学基金(52078392、52078236);国家重点研发计划(2022YFC3080400);长江科学院开放研究基金(CKWV2021872/KY)

**作者简介:**王嘉鑫(1997-),女,主要从事加筋土与岩土抗震研究,E-mail:wangjiaxin2563@whu.edu.cn。

郑焯炜(通信作者),男,教授,博士生导师,E-mail:yzheng@whu.edu.cn。

**Received:** 2022-08-24

**Foundation items:** National Natural Science Foundation of China (No. 52078392, 52078236); National Key R&D Program of China (No. 2022YFC3080400); Changjiang River Scientific Research Institute Open Research Fund (No. CKWV2021872/KY)

**Author brief:** WANG Jiaxin (1997-), main research interests: geosynthetic reinforced soil and geotechnical earthquake engineering, E-mail: wangjiaxin2563@whu.edu.cn.

ZHENG Yewei (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: yzheng@whu.edu.cn.

clay foundation. The results show that with the increase of geosynthetic encasement stiffness and soft soil shear modulus, the decrease of embankment load, the settlement of stone column and the strains of geosynthetic encasement and soils could be significantly reduced. Geosynthetic encasement could effectively improve the seismic performance of stone column in soft clay foundation.

**Keywords:** geosynthetics; stone column; geosynthetic encased stone column; seismic response; soft clay foundation

碎石桩复合地基是常见的地基处理技术,具有良好的排水能力,可以减小沉降,增强稳定性,有效提高地基承载力<sup>[1]</sup>。碎石桩属于散体材料桩,其承载能力主要取决于周围土体的侧向约束力。在软土地基中,如果土体的侧向约束力不足,碎石桩容易发生鼓胀破坏,此时桩周软土会挤入碎石,堵塞排水通道,降低排水能力,严重影响复合地基的沉降控制效果和稳定性。为了解决上述问题,利用土工合成材料环向包裹碎石桩,形成土工合成材料包裹碎石桩。这项技术通过土工合成材料的约束作用,减小软土地基中碎石桩的侧向变形,进一步提高地基承载力<sup>[2]</sup>。土工合成材料包裹碎石桩技术越来越受到研究人员和工程界的关注,且已被用于实际工程,取得了良好的应用效果<sup>[3]</sup>。中国震灾严重,地震会对隧道、路堤等交通基础设施造成严重破坏<sup>[4]</sup>。碎石桩可用于地震活跃区软土地基的加固。与碎石桩相比,包裹碎石桩可以通过土工合成材料包裹提供额外的径向约束和抗剪能力。因此,土工合成材料包裹碎石桩技术也是提高软土地基抗震性能的可行选择。

赵明华等<sup>[5]</sup>根据极限平衡理论推导了不同破坏模式包裹碎石桩的单桩极限承载力计算公式,发现相比碎石桩,包裹碎石桩的承载力显著提高。陈建峰等<sup>[6]</sup>通过一系列三轴压缩试验研究了筋材和围压对包裹碎石桩力学特性的影响,发现三轴压缩下包裹碎石桩呈剪胀破坏。张玲等<sup>[7]</sup>通过一系列直剪试验研究了包裹碎石桩复合体抗剪性能的影响因素,发现筋材抗拉强度越大,加筋效果越明显。欧阳芳等<sup>[8]</sup>通过一系列室内模型试验研究了筋材长度和刚度对包裹碎石桩性能的影响,发现筋材全长包裹的碎石桩有效地提高了碎石桩的承载力和刚度,且筋材刚度越大,提高效果越明显。Murugesan等<sup>[9]</sup>通过剪切试验和大型室内模型试验研究了碎石桩和包裹碎石桩的抗剪强度及筋材对碎石桩单桩和碎石桩群承载能力的影响。陈建峰等<sup>[10-11]</sup>、陈贺等<sup>[12]</sup>通过离心机模型试验研究了路堤荷载作用下包裹碎石桩复合地基的力学特性,发现路堤中心至坡脚范围内的地基发生沉降变形,坡脚以外的地基发生隆起变形。随着筋材刚度的增加,隆起变形减小,桩顶

和桩间土沉降减少,桩土应力比增加,差异沉降增大。总体而言,目前的研究大多集中在包裹碎石桩的静力特性方面。在包裹碎石桩的动力特性方面,Cengiz等<sup>[13-15]</sup>开展了一系列振动台试验,研究了软黏土地基中包裹碎石桩的地震动响应,发现筋材可以有效减小地震荷载作用下复合地基的沉降,且筋材刚度越大,沉降改善效果越明显。总体而言,对软土地基中包裹碎石桩动力响应的研究很少,为了将土工合成材料包裹碎石桩技术应用于地震活跃区,需要深入研究其抗震加固效果。

笔者利用三维有限差分程序FLAC3D研究软土地基中土工合成材料包裹碎石桩的地震动响应,通过参数分析研究筋材刚度、软土剪切模量、路堤高度等参数对动力响应的规律,包括桩顶沉降、由地震引起的筋材应变增量和土体剪应力-应变响应等。

## 1 数值模型

采用有限差分程序FLAC3D建立数值模型,并通过Cengiz等<sup>[14]</sup>开展的大型振动台试验验证模型。

### 1.1 振动台试验描述

Cengiz等<sup>[14]</sup>开展了一系列包裹碎石桩的振动台试验,笔者选用3组典型试验进行验证,如表1所示。复合地基中土层总深度为1.9 m,包括底部0.15 m厚的持力层、中间1.35 m厚的软土层和顶部0.4 m厚的砂垫层。层状剪切模型箱的平面尺寸为0.9 m×0.9 m,内置4根桩体。碎石桩的直径为0.136 m,对应的面积置换率约为7%。碎石桩长度为1.35 m,贯穿整个土体软土层,位于持力层上。对于包裹碎石桩模型,土工合成材料筋材全长包裹桩体。在模型箱顶部施加25 kPa的竖向应力,模拟上部路堤荷载。输入波采用将El Centro波原始加速度幅值缩小至其0.25倍的地震波,记为25% El Centro。试验详细介绍参考文献[14]。

表1 振动台试验工况<sup>[14]</sup>

Table 1 Shaking table test program

桩体类型	筋材刚度/(kN/m)	地震波
碎石桩		25% El Centro
包裹碎石桩1	400	25% El Centro
包裹碎石桩2	1 000	25% El Centro

### 1.2 数值模型

根据振动台试验建立数值模型。底部边界在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向固定;垂直于  $y$  方向的两侧边界在  $y$  方向上固定;垂直于  $x$  方向的两侧边界将边界两侧相同高度处的相应节点捆绑在一起,以确保  $x$  方向两侧的水平位移相同。Rayamajhi 等<sup>[16]</sup>使用了类似的方法来模拟地震作用下近地表地层的剪切变形。

UCSDSAND3 是一个三维多屈服面压力相关模型,Khosravifar 等<sup>[17]</sup>和 Tiznado 等<sup>[18]</sup>分别用其模拟了动荷载作用下砂土和碎石桩的动力特性,并开展了相关验证,结果表明,UCSDSAND 本构模型可以较为准确地模拟粗粒土的动力特性。因此,在本研究中,UCSDSAND3 本构模型用于模拟砂垫层、碎石桩和持力层。表 2 列出了数值模型中砂垫层、碎石桩和持力层的主要参数。

表 2 粗粒土主要模型参数

Table 2 Model parameters for granular soils

基础地层	密度 $\rho$ / (kg/m <sup>3</sup> )	参考剪切模量 $G_{max,r}$ /MPa	参考体积模量 $B_r$ /MPa	摩擦角 $\phi$ / (°)	相变角 $\phi_{PT}$ / (°)
砂垫层	2 030	37.8	101.0	38	30.8
碎石桩	2 060	44.8	119.3	42	37.2
持力层	2 060	44.8	119.3	42	37.2

桩周围软土采用 UCSDCLAY 本构模型模拟。UCSDCLAY 是一种三维弹塑性模型,Elgamal 等<sup>[19-20]</sup>将其用于模拟黏性土的非线性滞回行为和永久剪切应变的累积。该模型可以模拟不排水条件下软土的动力特性。软土的主要模型参数如表 3 所示。

表 3 软土模型参数

Table 3 Model parameters for soft clay

密度 $\rho$ / (kg/m <sup>3</sup> )	剪切模量 $G$ /MPa	不排水剪强度 $s_u$ /kPa
1 500	0.07	6

对于包裹碎石桩,使用 FLAC3D 中的土工格栅单元模拟碎石桩和软土之间的包裹筋材。筋材的厚度为 1 mm,对应工况的拉伸刚度分别取为 400、1 000 kN/m。由于 geogrid 单元无法模拟明确的分界面,为了更好地模拟筋材的包裹作用,土工合成材料与相邻土体(即碎石桩和软土)之间采用刚性连接,即假设筋材与相邻土体不发生相对位移。

模拟过程分为静力和动力两个阶段。静力阶段,首先,建立包裹碎石桩的数值模型,然后施加 25 kPa 的竖向应力,同时,采用足够大的抗剪强度防止土体屈服,求解达到初始应力状态。然后将强度设

置为实际值,并在静力荷载下求解达到平衡状态。动力阶段,设置土体材料瑞利阻尼为 0.5%,用于考虑低应变水平下的能量耗散,在模型底部沿  $x$  轴水平方向输入 25% El Centro 地震波。

### 1.3 振动台试验验证

对 Cengiz 等<sup>[14]</sup>的 3 组振动台试验进行验证,数值模拟与试验结果的对比如图 1 所示。模拟结果表明,土工合成材料包裹筋材可以有效减小地震作用下碎石桩的沉降,同时筋材刚度越大,减小效果越明显,这一趋势与振动台试验结果一致。对比数值模拟和试验的地震后残余沉降,碎石桩(SC)的沉降结果吻合较好,筋材刚度为 400 kN/m ( $J=400$  kN) 和 1 000 kN/m ( $J=1\ 000$  kN) 的包裹碎石桩沉降的模拟结果比试验结果稍小。筋材采用线弹性单元模拟,选取 5% 拉伸应变所对应的割线模量,并未考虑筋材的非线性特性。此外,有纺土工布在纵向和横向的拉伸刚度一般不同,但是试验并没有分别提供两个方向的拉伸刚度。因此,采用各向同性的筋材模型,假设纵向和横向的拉伸刚度相同。这些都可能在一定程度上强化筋材的作用<sup>[21]</sup>,导致模拟沉降值和试验结果的差异。总体而言,数值模型能够较为准确地模拟土工合成材料包裹筋材对碎石桩的加固作用。

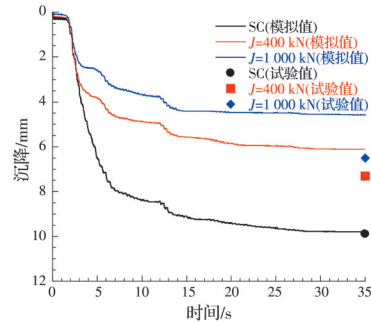


图 1 试验与模拟沉降对比

Fig. 1 Comparison of experimental and simulated settlement results

## 2 参数分析

在动力参数分析中,选择包裹碎石桩复合地基的单元体模型进行模拟。三维数值模型及其相应的侧视图和平面视图如图 2 所示。土层总深度为 12 m,包括底部 1 m 厚的持力层、中间 10 m 厚的软土层和顶部 1 m 厚的砂垫层。单元模型的平面尺寸为 2.2 m × 2.2 m。碎石桩的直径为 0.8 m,对应的面积置换率为 10%。碎石桩长度为 10 m,贯穿整个土体软土层,位于坚硬的持力层上。对于包裹碎石桩模型,采用全长包裹方式,筋材刚度为 2 000 kN/m,并在模型顶部施加 120 kPa 的竖向应力,以模拟 6 m 高

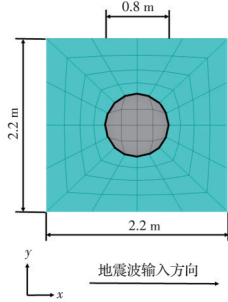
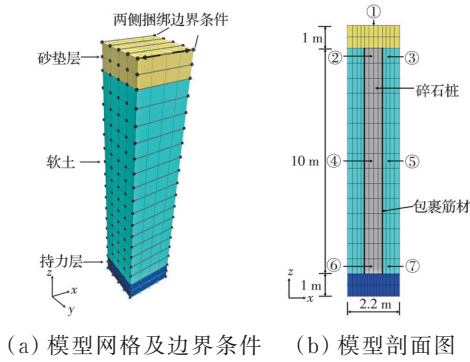


图 2 三维数值模型  
Fig. 2 3D numerical model

路堤的自重荷载。输入地震波选用 1989 年 Loma Prieta 地震 Gilroy-Gavilan College 站的记录波。经基线校正和滤波后的加速度时程如图 3 所示。其峰值加速度为 0.27g, 出现在 6.7 s 附近。

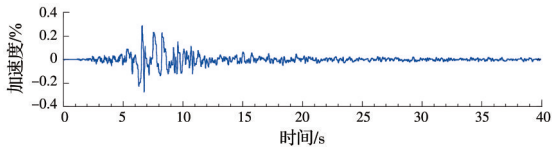


图 3 地震波加速度时程曲线  
Fig. 3 Acceleration time history of earthquake motion

基准工况中砂垫层、碎石桩、持力层相关参数的选取如表 4 所示,软土相关参数的选取如表 5 所示。参数分析主要研究筋材刚度、软土剪切模量和路堤荷载 3 个参数对软土地基中包裹碎石桩动力响应的影响,不同工况的具体参数取值如表 6 所示。其中,加粗数值为基准工况取值,其他工况仅改变特定研究参数取值,共包括 10 组模拟工况。

表 4 粗粒土主要模型参数

基础地层	密度 $\rho / (\text{kg}/\text{m}^3)$	参考剪切模量 $G_{\text{max},r} / \text{MPa}$	参考体积模量 $B_r / \text{MPa}$	摩擦角 $\phi / (^\circ)$	相变角 $\phi_{PT} / (^\circ)$
砂垫层	1 990	73.7	196.8	30.3	25.3
碎石桩	2 030	94.6	252.6	35.8	30.8
持力层	2 060	111.9	298.3	42.2	37.2

表 5 软土模型参数

密度 $\rho / (\text{kg}/\text{m}^3)$	剪切模量 $G / \text{MPa}$	不排水剪强度 $s_u / \text{kPa}$
1 500	2	20

表 6 参数分析取值

筋材刚度 $J / (\text{kN}/\text{m})$	软土剪切模量 $G / \text{MPa}$	路堤荷载 $\sigma_v / \text{kPa}$
2 000, 4 000, 6 000, 8 000	1.3, 2.0, 2.7, 3.4	0, 60, 120, 180

注:加粗参数为基准工况取值

## 2.1 筋材刚度对动力响应的影响

### 2.1.1 沉降结果分析

图 4 为地震荷载作用下不同包裹筋材刚度的碎石桩顶部(如图 3(b)中 1 所示)沉降时程曲线。不同筋材刚度的包裹碎石桩在前 5 s 地震荷载作用下的沉降差异很小。5 s 后,包裹碎石桩的沉降急剧增加。随着筋材刚度的增加,沉降明显减小。之后,包裹碎石桩的沉降基本稳定。最终的残余沉降分别为 22.1、21.3、20.5、19.7 mm。筋材刚度每增加 2 000 kN/m,地震引起的沉降约相应减少 4%。地震作用初始阶段,筋材中产生的拉应变较小,此时土工合成材料包裹效果不明显。随着地震波能量的释放,土体剪应变在地震作用下显著增加,筋材拉应变也增加,此时包裹筋材的拉应力得到发挥,为碎石桩提供了额外的约束作用。结果表明,土工合成材料包裹筋材可以有效减小包裹碎石桩复合地基的沉降,提高复合地基的抗震性能。

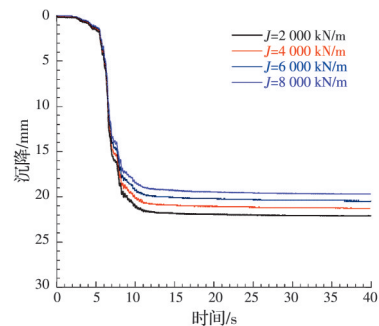


图 4 筋材刚度对沉降时程曲线的影响  
Fig. 4 Effect of geosynthetic encasement stiffness on settlement time histories

### 2.1.2 筋材应变结果分析

土工合成材料包裹筋材可以在竖向荷载作用下,对碎石桩提供径向约束。由地震作用引起的包裹筋材沿深度的最大环向应变增量分布如图 5(a) 所示。刚度为 2 000 kN/m 的筋材最大环向应变增量出现在深度 5 m 处附近,为 0.085%。当筋材刚度增加到 4 000、6 000、8 000 kN/m 时,5 m 处最大环向

应变增量分别为 0.074%、0.067%、0.061%。可以看出,随着筋材刚度的增加,由地震引起的筋材环向应变增量明显减小。

在地震荷载作用下,土工合成包裹材料还可以提供纵向拉力,从而限制碎石桩的剪切变形。由地震引起的包裹筋材最大纵向应变增量沿深度分布如图 5(b)所示。桩体底部纵向应变增量最大,达到约 0.25%。这表明在振动过程中,碎石桩底部产生了较大的剪应力,可能是由于软土层和持力层刚度差异较大,导致具有较小模量的软土底部筋材应变偏大。筋材刚度对筋材纵向应变的影响不明显,可能是因为地震波强度较弱,较低刚度的筋材能提供足够的抗剪强度。

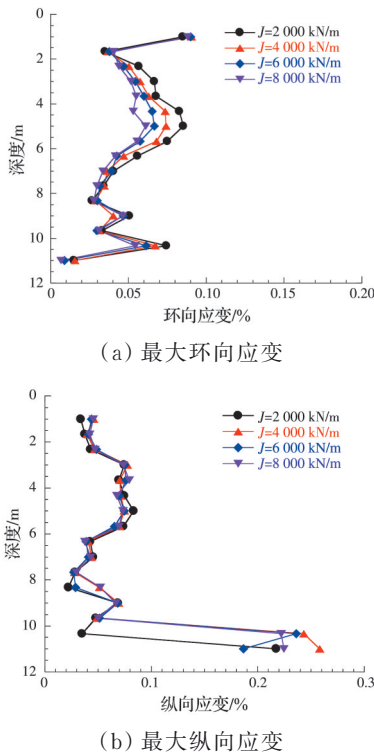


图 5 筋材刚度对筋材应变的影响  
Fig. 5 Effect of geosynthetic encasement stiffness on tensile strains

2.1.3 剪应力-应变曲线结果分析

图 6 为碎石桩和软土在图 3(b)中所示 2~7 处的剪应力-应变响应。对于碎石桩,筋材包裹刚度大的碎石桩剪应变小于筋材包裹刚度小的碎石桩,尤其在桩底部。这是因为土工合成材料在径向和纵向为碎石桩提供了约束,限制了桩体的侧向变形,从而增加了碎石桩的整体刚度。对于桩体周围的软土,筋材包裹刚度大的桩周软土的剪应变略小于筋材包裹刚度小的桩周软土。在相同深度处,碎石桩的剪应力远大于软土,剪应变也小得多,这是因

为碎石桩具有更高的强度和刚度。

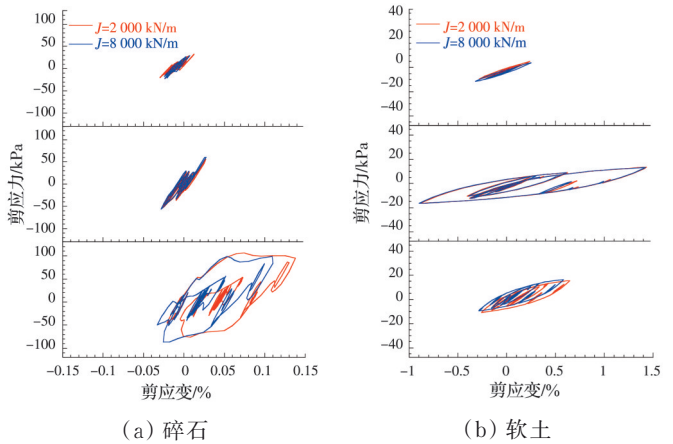


图 6 筋材刚度对土体剪应力-应变响应的影响

Fig. 6 Effect of geosynthetic encasement stiffness on soil shear stress-strain response

2.2 软土剪切模量对动力响应的影响

2.2.1 沉降结果分析

图 7 为地震荷载作用时不同软土剪切模量下碎石桩顶部的沉降时程曲线。在前 5 s 地震荷载作用下碎石桩的沉降均小于 3 mm;5 s 后,随着地震波的进行,沉降急剧增大;10 s 后,桩顶沉降逐渐达到稳定。软土剪切模量为 1.3、2.0、2.7、3.4 MPa 的碎石桩顶震后残余沉降分别为 29.9、22.1、17.8、14.9 mm。在地震荷载作用的初始阶段,地震波能量较低,土体剪应变较小。随着地震波的进行,能量大幅增大,所引起的土体剪应变显著增加,剪切模量较高的软土产生的剪应变较小,对应的沉降也更小。当软土剪切模量由 1.3 MPa 增加到 2.0 MPa 时,地震引起的沉降减少最为明显,约为 26%。但随着软土剪切模量的进一步增加,沉降的改善效果相应减小。模拟结果表明,随着软土剪切模量的增大,包裹碎石桩复合地基的沉降逐渐减小,但减小沉降的效果逐渐减弱。

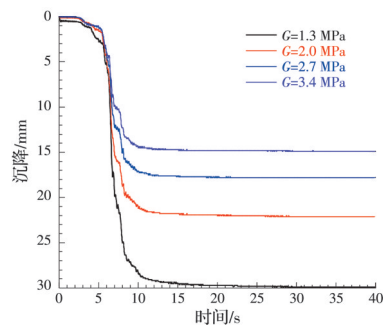


图 7 软土剪切模量对沉降时程曲线的影响

Fig. 7 Effect of shear modulus of soft clay on settlement time histories

2.2.2 筋材应变结果分析

在竖向荷载下,桩周土可以对碎石桩提供径向约束,桩周土模量越大,径向约束作用越强。在地震荷载作用下,桩周土不仅能减小桩体的鼓胀变形,也能限制剪切变形。由地震作用引起的包裹筋材沿深度的最大环向应变增量分布如图 8(a)所示。软土剪切模量为 1.3 MPa 的筋材最大环向应变增量在深度 10.3 m 处,为 0.15%。软土剪切模量为 2.0、2.7、3.4 MPa 的筋材最大环向应变增量在 5 m 处,分别为 0.085%、0.072%、0.055%。随着软土剪切模量的增加,由地震引起的筋材环向应变增量明显减小,并且最大环向应变增量的位置从下部逐渐向中部移动。

地震引起的土工合成材料包裹筋材纵向应变增量沿深度分布如图 8(b)所示。在地震荷载作用下,桩体底部纵向应变增量最大,软土剪切模量为 1.3 MPa 时底部纵向应变为 0.32%,而其他较大剪切模量下纵向应变约为 0.25%。整体而言,随着软土剪切模量的增加,筋材的纵向应变增量有一定减小,但当剪切模量增大到一定值时,其影响较小。

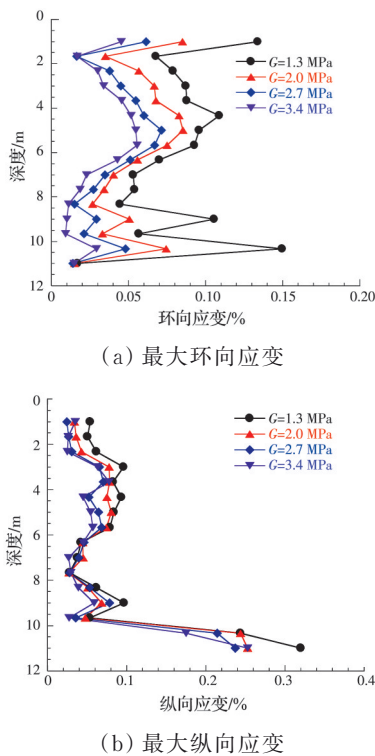


图 8 软土剪切模量对筋材应变的影响  
Fig. 8 Effect of shear modulus of soft clay on tensile strains

2.2.3 剪应力-应变曲线结果分析

图 9 为碎石桩和软土的剪应力-应变响应。对于碎石桩,随着软土剪切模量的增加,碎石桩的剪应变明显减小。这是因为软土剪切模量的增加提

高了桩周土对碎石桩的径向和纵向约束作用,限制了桩体的变形,从而增大了包裹碎石桩复合地基的整体刚度。对于桩体周围的软土,随着剪切模量的增加,其剪应变大幅减小。

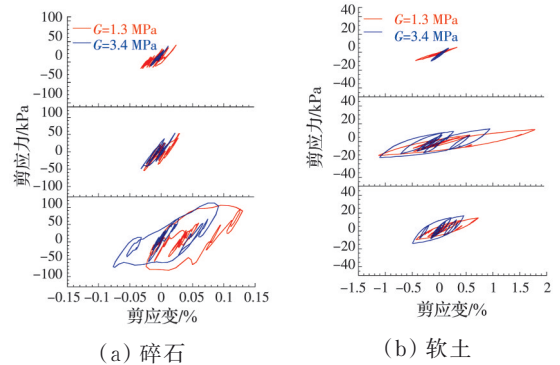


图 9 软土剪切模量对土体剪应力-应变响应的影响  
Fig. 9 Effect of shear modulus of soft clay on soil shear stress-strain response

2.3 路堤荷载对动力响应的影响

2.3.1 沉降结果分析

图 10 为地震荷载作用时不同路堤荷载作用下碎石桩顶部的沉降时程曲线。竖向应力 0、60、120、180 kPa 分别对应路堤高度为 0、3、6、9 m 所产生的自重荷载。路堤荷载为 0、60、120、180 kPa 的桩顶震后残余沉降分别为 14、19.9、22.1、24 mm。数值模拟结果表明,随着路堤荷载的增加,复合地基的沉降明显增加,当路堤荷载由 0 增加为 180 kPa 时,桩顶沉降增加 70.4%。

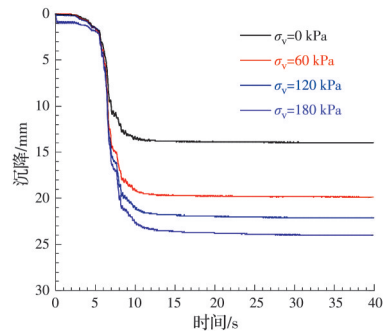


图 10 路堤荷载对沉降时程曲线的影响  
Fig. 10 Effect of embankment load on settlement time histories

2.3.2 筋材应变结果分析

不同路堤荷载作用下,由地震作用引起的包裹筋材沿深度的最大环向应变增量分布如图 11(a)所示。没有路堤荷载时,筋材最大环向应变增量发生在桩中间高度附近;有路堤荷载时,筋材的环向应变增量发生在桩中上部。这是因为在路堤荷载作用下,复合地基上部所承受的竖向荷载越大,桩体上部

产生的鼓胀变形越大,这与静力荷载作用下桩体的变形规律一致<sup>[22]</sup>。

由地震荷载引起的土工合成材料包裹筋材的纵向应变增量沿深度分布如图 11(b)所示。在地震荷载作用下,桩体底部纵向应变增量最大。当路堤荷载由 0 增加为 60 kPa 时,筋材的纵向应变明显减小,但当路堤荷载继续增加时,筋材纵向应变增量的变化将不明显。

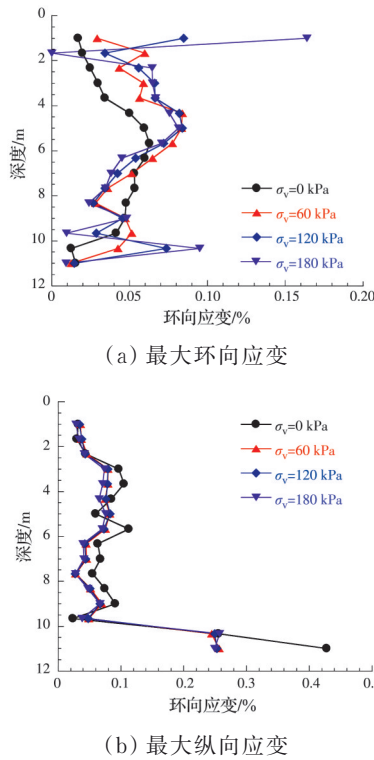


图 11 路堤荷载对筋材应变的影响

Fig. 11 Effect of embankment load on tensile strains

2.3.3 剪应力-应变曲线结果分析

图 12 为路堤荷载对碎石桩和软土剪应力-应变

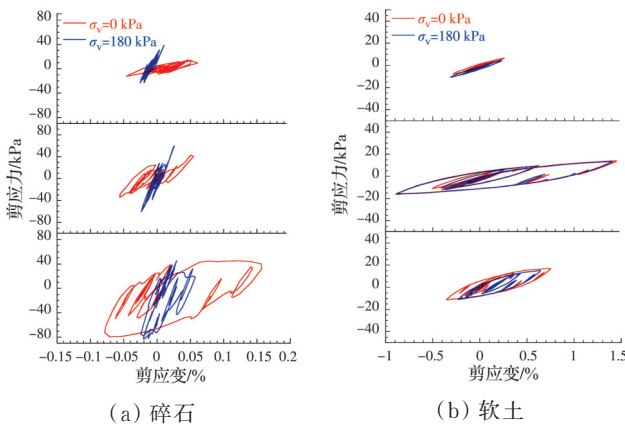


图 12 路堤荷载对土体剪应力-应变响应的影响

Fig. 12 Effect of embankment load on shear stress-strain response of soil

响应的影响。对于碎石桩,随着路堤荷载的增大,碎石桩剪应变明显减小。这是因为随着上部荷载的增加,碎石的强度和模量都增大,增强了复合地基的抗剪能力,提高了复合地基的整体刚度。对于桩周围的软土,随着路堤荷载的增加,软土剪应变减小,但改善效果较弱。这是由于在不排水条件下,采用的 UCSDCLAY 本构模型中土体行为不受围压的影响。因此,不同路堤荷载作用下,其剪应力-应变曲线区别较小。

3 结论

通过动力数值模拟研究了地震作用下土工合成材料包裹碎石桩复合地基的动力响应特性。利用验证的三维数值模型开展了参数分析,主要结论如下:

1) 增加包裹碎石桩筋材刚度可以提高包裹碎石桩的径向和纵向约束力,从而使桩顶沉降、地震引起的筋材环向应变增量以及土体剪应变明显减小。在所研究的地震波下,筋材刚度对筋材竖向应变增量的影响较小。

2) 增大软土剪切模量可以提高桩周土的约束作用,有效减小包裹碎石桩顶的沉降,同时地震引起的筋材应变增量和土体剪应变也明显减小。

3) 随着路堤竖向荷载的增大,桩顶沉降及地震引起的筋材最大环向应变显著增加,并且筋材最大环向应变的位置向桩上部移动。随着路堤荷载的增大,碎石的强度和模量都增大,筋材的约束作用也增强,碎石桩的剪应变明显减小。

参考文献

[1] ZHENG G, YU X X, ZHOU H Z, et al. Stability analysis of stone column-supported and geosynthetic-reinforced embankments on soft ground [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2020, 48(3): 349-356.

[2] 陈建峰, 童振涓, 柳军修, 等. 竖向荷载下加筋碎石桩复合地基数值分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(Sup2): 393-399.

CHEN J F, TONG Z M, LIU J X, et al. Numerical analyses of composite foundation of geosynthetic-encased stone columns subjected to vertical loading [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(Sup2): 393-399. (in Chinese)

[3] SCHNAID F, WINTER D, SILVA A E F, et al. Geotextile encased columns (GEC) used as pressure-relief system. Instrumented bridge abutment case study on soft soil [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2017, 45(3): 227-236.

[4] ZHENG G, ZHANG W B, ZHANG W G, et al. Neural network and support vector machine models for the prediction of the liquefaction-induced uplift

- displacement of tunnels [J]. *Underground Space*, 2021, 6 (2): 126-133.
- [5] 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.  
ZHAO M H, CHEN Q, ZHANG L, et al. Calculation of bearing capacity of geosynthetic-encased stone columns [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2011, 28(8): 7-12. (in Chinese)
- [6] 陈建峰, 王兴涛, 曾岳, 等. 土工织物散体桩桩体大三轴试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2017, 39(12): 2212-2218.  
CHEN J F, WANG X T, ZENG Y, et al. Large triaxial compression tests on geosynthetic-encased granular columns [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2017, 39(12): 2212-2218. (in Chinese)
- [7] 张玲, 刘长捷, 赵明华, 等. 筋箍碎石桩复合体抗剪性能研究[J]. *土木工程学报*, 2022, 55(5): 86-96.  
ZHANG L, LIU C J, ZHAO M H, et al. Study on shear performance of stirrup-encased stone column composite ground [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2022, 55(5): 86-96. (in Chinese)
- [8] 欧阳芳, 张建经, 付晓, 等. 包裹碎石桩承载特性试验研究[J]. *岩土力学*, 2016, 37(7): 1929-1936.  
OUYANG F, ZHANG J J, FU X, et al. Experimental analysis of bearing behavior of geosynthetic encased stone columns [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37 (7): 1929-1936. (in Chinese)
- [9] MURUGESAN S, RAJAGOPAL K. Studies on the behavior of single and group of geosynthetic encased stone columns [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2010, 136(1): 129-139.
- [10] 陈建峰, 李良勇, 徐超, 等. 路堤荷载下土工织物散体桩复合地基离心模型试验[J]. *岩土工程学报*, 2018, 40 (5): 932-938.  
CHEN J F, LI L Y, XU C, et al. Centrifugal model tests on composite foundation reinforced by geosynthetic-encased stone columns under embankment loads [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2018, 40 (5): 932-938. (in Chinese)
- [11] 陈建峰, 王波, 魏静, 等. 加筋碎石桩复合地基路堤模型试验[J]. *中国公路学报*, 2015, 28(9): 1-8.  
CHEN J F, WANG B, WEI J, et al. Model test of embankment on composite foundation reinforced with geosynthetic-encased stone columns [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2015, 28(9): 1-8. (in Chinese)
- [12] 陈贺, 李兴庆, 李桂林, 等. 土工材料包裹碎石桩复合地基试验研究[J]. *中外公路*, 2019, 39(1): 13-19.  
CHEN H, LI X Q, LI G L, et al. Experiment study on composite foundation reinforced with geosynthetic-encased stone columns [J]. *Journal of China & Foreign Highway*, 2019, 39(1): 13-19. (in Chinese)
- [13] CENGIZ C, GÜLER E. Seismic behavior of geosynthetic encased columns and ordinary stone columns [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2018, 46 (1): 40-51.
- [14] CENGIZ C, GULER E. Shaking table tests on geosynthetic encased columns in soft clay [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2018, 46(6): 748-758.
- [15] CENGIZ C, GULER E. Load bearing and settlement characteristics of Geosynthetic Encased Columns under seismic loads [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2020, 136: 106244.
- [16] RAYAMAJHI D, ASHFORD S A, BOULANGER R W, et al. Dense granular columns in liquefiable ground. I: Shear reinforcement and cyclic stress ratio reduction [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2016, 142(7): 04016023.
- [17] KHOSRAVIFAR A, ELGAMAL A, LU J, et al. A 3D model for earthquake-induced liquefaction triggering and post-liquefaction response [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2018, 110: 43-52.
- [18] CARLOS TIZNADO J, DASHTI S, LEDEZMA C. Probabilistic predictive model for liquefaction triggering in layered sites improved with dense granular columns [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2021, 147(10): 04021100.
- [19] ELGAMAL A, YAN L J, YANG Z H, et al. Three-dimensional seismic response of Humboldt Bay bridge-foundation-ground system [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2008, 134(7): 1165-1176.
- [20] ELGAMAL A, YANG Z, PARRA E, et al. Modeling of cyclic mobility in saturated cohesionless soils [J]. *International Journal of Plasticity*, 2003, 19(6): 883-905.
- [21] KHABBAZIAN M, KALIAKIN V N, MEEHAN C L. 3D analyses of geosynthetic encased stone columns [C]//Proceedings of International Foundations Congress and Equipment Expo 09 (IFCEE09), Contemporary Topics in Ground Modification, Problem Soils, and Geo-Support, Geotechnical Special Publication No. 187, 2009: 201-208.
- [22] 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(Sup2): 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(Sup2): 209-212. (in Chinese)