

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.201901008

包裹碎石群桩动应力响应振动台模型试验研究*

欧阳芳^{1,2}, 周永毅², 王志佳³, 李良勇³

(1. 湖北第二师范学院建筑与材料工程学院, 湖北 武汉 430000; 2. 西南交通大学土木工程学院, 四川 成都 610031;
3. 海南大学土木建筑工程学院, 海南 海口 570228)

摘要: 开展了包裹碎石群桩复合地基振动台模型试验, 分析了包裹碎石桩轴向动应力及桩土之间水平剪切应力的响应特性。结果表明: 地震波作用下, 包裹碎石桩轴向动应力沿桩身向下迅速衰减。在地震作用过程中, 包裹碎石桩上部承受的水平应力较大。某一地震作用下, 取包裹碎石桩桩顶水平应力时程曲线的最大值, 发现该值随输入地震加速度波峰值(0.1g~0.4g)的增大先增大, 之后随输入加速度波峰值(0.6g、0.9g)的增大而减小, 这表明桩顶的剪切强度降低了。

关键词: 包裹碎石桩; 振动台模型试验; 砂土; 动应力

中图分类号: TU473 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2021)05-1062-09

Study on Dynamic Stress Responses of Geosynthetic Encased Stone Columns by Shaking Table Model Tests

Ouyang Fang^{1,2}, ZHOU Yongyi², WANG Zhijia³, LI Liangyong³

(1. Department of Architecture and Materials Engineering, Hubei University of Education, Wuhan 430000, China;
2. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;
3. School of Civil Engineering and Architecture, Hainan University, Haikou 570228, China)

Abstract: Shaking table model tests on the composite ground improved by geosynthetic encased stone columns were conducted, which were utilized to study the response characteristics of axial stress in geosynthetic encased stone columns and horizontal shear stress between soil and columns. The test results show that the axial dynamic stress of the geosynthetic encased stone column decreased rapidly along the column depth, and the horizontal stress in the upper part of the column was higher than the lower part under the action of an earthquake. The maximum horizontal stress on the geosynthetic encased stone column head was obtained from the time history curve, which increased with the input peak acceleration (0.1g~0.4g) firstly, and then decreased with the increase of the input peak acceleration (0.6g, 0.9g). Therefore, it can be drawn that the shear strength of the geosynthetic encased stone column head has decreased.

Keywords: geosynthetic encased stone column; shaking table test; sand; dynamic stress

* 收稿日期: 2019-01-08; 修回日期: 2019-03-28

基金项目: 海南省自然科学基金青年基金项目(518QN214)、海南大学科研启动基金项目(KYQD(ZR)1722)资助
作者简介: 欧阳芳(1990—), 女, 讲师, 博士。主要从事岩土工程抗震和地基处理方面的研究。

E-mail: ouyangfang26@126.com

通讯作者: 王志佳(1987—), 男, 讲师, 博士。主要从事岩土地震工程方面的研究。E-mail: 993041@hainu.edu.cn

引言

由于碎石桩或砂石桩具有能够有效提高地基承载力、固结排水以及施工方便快捷等优点,因此被广泛应用于软土地基处理^[1]。但当周围土体抗剪强度较低时,碎石骨料挤入周围土体中,增大碎石用量,且桩体可能因鼓胀量较大而发生破坏。为此,W. F. Van Impe^[2]提出在碎石桩外包裹一层土工材料,利用土工材料套筒为其提供径向约束作用。M. Raithel等^[3-4]由包裹碎石桩加固堤坝和路基工程发现,包裹碎石桩可有效加固较软土体,满足其所需承载力,且能加速排水固结、节约工程费用。众多学者通过模型试验、数值分析、理论计算也发现包裹碎石桩可有效提高软土地基承载力,加速地基固结排水^[5-23,25,27]。

对桩体应力和变形特点的研究有助于认识桩体的承载力机理。研究人员通过试验和数值分析研究了包裹碎石桩的应力和变形规律^[8-21]。S. Murugesan等^[8]指出包裹碎石桩的抗剪强度相比碎石桩提高一倍左右;S. K. Dash等^[9-10]通过模型试验研究了包裹碎石桩的桩体鼓胀变形特点,发现相同应力下其鼓胀变形远小于碎石桩;陈建峰等^[11-12]研究了套筒刚度对包裹碎石桩复合地基变形及稳定性的影响,表明由于套筒的作用,在路堤荷载作用下,桩体可产生较大的弯曲变形,但不发生剪切破坏或弯折拉裂破坏;M. S. S. Almeida等^[13-14]通过现场试验和数值模拟研究了包裹碎石桩加固路基的表面沉降、超孔隙水压力、桩土应力比等参数的变化规律;M. Gu等^[15-16]利用三维有限差分法研究了包裹碎石桩单桩在无侧限压力下的应力和变形特性;赵明华等^[17]基于圆孔扩张理论,获得了可考虑套筒与桩、土协调变形的包裹碎石桩复合地基极限承载力计算方法;Y. P. Zhang等^[18-19]提出了包裹碎石桩复合地基应力和沉降计算的理论解,并提出了包裹碎石桩复合地基固结度计算的理论解^[20];J. Castro等^[21]通过理论方法研究了包裹碎石桩加固软土地基,指出套筒可有效减小地基沉降,提高桩体应力集中效应,加速地基固结。

近年来全球地震频发,如2008年中国汶川地震、2010年智利地震、2011年日本东北地区太平洋

近海地震等,均伴有严重的地基震害问题,对地基提出抗震方面的要求。然而,上述有关包裹碎石桩的研究均基于静力荷载,迄今为止,仅L. Tang等^[22]利用数值模拟针对地震作用下包裹碎石桩的抗液化性能进行了研究。振动台试验可再现地震发生时地基的应力、变形规律,是研究地基地震响应的一种有效手段。为此,本文开展了包裹碎石桩复合地基振动台模型试验,研究在不同类型、峰值地震作用下包裹碎石桩复合地基的加速度、轴向应力、水平剪切应力响应,分析其抗震性能。有关包裹碎石桩复合地基的加速度响应和破坏特性已在文献[23]中进行了研究,本文仅对包裹碎石桩和周围土体中的应力响应进行分析。

1 振动台模型试验布置

1.1 相似关系设计

包裹碎石桩复合地基振动台模型试验在重庆交科院三向六自由度的振动台上开展。选用堆叠剪切式模型箱,各层框架间可自由产生相对水平位移,剪切箱内部尺寸为1.65(长)×1.45(宽)×1.50(高)m³。在模型箱内壁衬泡沫薄膜,吸收传递至模型边界的地震波,防止地震波反射回模型箱内。

试验设计时以长度、密度和加速度作为基本量纲,其相似常数(原型/模型)分别取为 $C_l=10$, $C_\rho=1$, $C_a=1$,根据 Buckingham π 定理^[24]可导出其他物理量的相似常数,见表1。

表1 模型相似常数

Table 1 Similarity constant of model tests

物理量	相似关系	相似常数	物理量	相似关系	相似常数
时间 C_t	$C_l^{1/2}/C_a^{1/2}$	$\sqrt{10}$	应力 C_p	$C_\rho C_l C_a$	10
频率 C_f	$C_a^{1/2}/C_l^{1/2}$	$1/\sqrt{10}$	抗拉强度 C_T	$C_\rho C_l^2 C_a$	100
质量 C_m	$C_\rho C_l^3$	1 000	力 C_F	$C_\rho C_l^3 C_a$	1 000

1.2 试验模型制备

开展了包裹碎石桩复合地基和碎石桩复合地基振动台模型试验。包裹碎石桩的设计参照已有工程实例^[25],一般桩径可取为0.5~1.54 m,桩体长径比可取为6~20,面积置换率可取为5%~20%。考虑试验中包裹碎石桩性质、成桩质量和模型箱尺

寸等因素,试验中选用长度相似比(原型/模型)为10,密度和重力加速度的相似比均为1,由 Buckingham π 定理计算得到土工材料套筒的抗拉强度相似比为100。包裹碎石桩桩长选为70 cm,桩径为9 cm,长径比约为8,桩间距为25 cm,采用正三角形布桩,共12根桩,承压板直径为44 cm,置于中心三根桩之上,面积置换率为13%,包裹碎石桩平面、立面布置如图1所示。为简化试验过程,注重复合地基的响应,把复合地基上的结构简化为高60 cm的实心钢柱,立于承压板之上,其质量为370 kg。碎石桩的设计参数与包裹碎石桩的设计参数相同,差别在于桩外无套筒。

模型箱内土层分为两层:底层为20 cm厚的坚硬土层、上部为100 cm厚的砂土,如图1(b)所示。

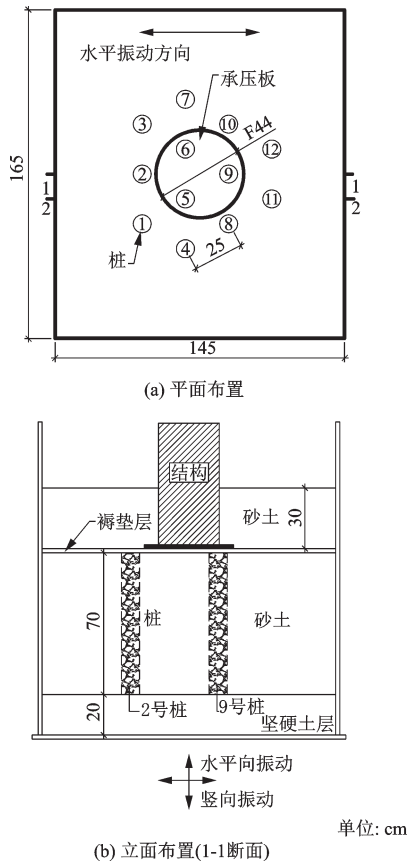


图1 包裹碎石桩复合地基布置
Fig.1 Layout of composite ground of geosynthetic encased stone columns

整个桩-土-结构模型的制作按照填筑坚硬土层→填筑砂土和制作桩体→填筑褥垫层→安设承压板和结构进行,步骤如下:

(1)坚硬土层厚20 cm。坚硬土层模拟桩底端稳定持力层,土层密度为 $2\ 200\text{ kg/m}^3$,含水率为7.8%。

(2)填筑完坚硬土层后,将外面套有土工材料套筒的成桩钢管下放到坚硬土层上并固定。成桩钢管直径为9 cm,土工材料套筒直径为9.2 cm。在模型箱内、钢管之外填筑砂土。砂土总厚度为100 cm,每次填筑质量约208 kg,让其从距砂土表面约70 cm高度处自由落下,填筑砂土时将成桩钢管顶端封住,以免砂土进入桩体内,如图2所示。为了保证结构的稳定性,基础下挖30 cm,形成浅埋基础。

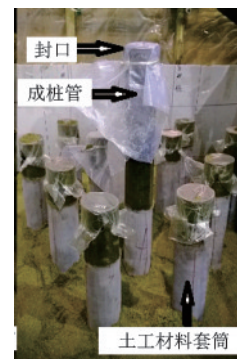


图2 填筑砂土
Fig.2 Filling sand

在砂土填筑完成后,对砂土进行取样并测试得到天然密度和含水率,计算得到砂土的干密度 ρ_d 。通过相对密度试验^[26]得到砂土的最大干密度 ρ_{dmax} 和最小干密度 ρ_{dmin} ,由此计算得到砂土的相对密度 Dr 为41%。根据相对密度 $Dr \leq 1/3$ 时,砂土处于疏松状态;当 $1/3 < Dr \leq 2/3$ 时,砂土处于中密状态;当 $2/3 < Dr \leq 1$ 时,砂土处于密实状态,可判断该砂土处于中密偏松状态。砂土的材料参数见表2。

(3)桩体内碎石骨料的级配曲线如图3所示。由图可得到,不均匀系数 C_u 为2.29,曲率系数 C_c 为

表2 砂土材料参数

Table 2 Properties of sand material

参数	天然密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	含水率/(%)	干密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	最大干密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	最小干密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	相对密度 Dr
取值	1 735	9.5	1 584	1 940	1 406	0.41

1.57, 碎石颗粒均匀, 级配不良。

碎石桩(碎石桩和包裹碎石桩内碎石)的密度为 1690 kg/m^3 , 经过多次调整, 确定成桩时每次碎石用量、振捣次数和振捣深度: 每次向成桩管内灌入约 0.6 kg 碎石, 利用一根直径 2 cm 的振捣棒插捣约 10 次, 插捣深度约为 5 cm , 同时向上缓慢抽拔成桩管 2 cm , 遗留套筒在土体原位置, 图 4 所示为制作桩体过程。碎石桩的制作与包裹碎石桩的类似, 只是桩外无土工材料套筒。

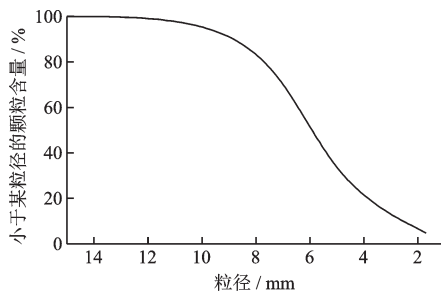


图 3 碎石级配曲线

Fig.3 Grading curve of the gravel



图 4 制作包裹碎石桩

Fig.4 Construction of geosynthetic encased stone columns

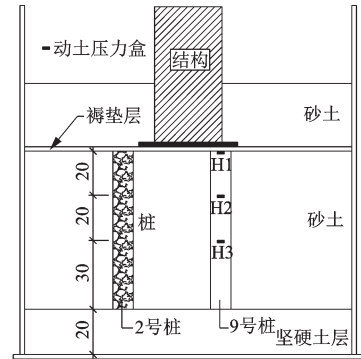
(4) 土工材料套筒与文献[23]相同, 土工材料的极限抗拉强度 T_{\max} 为 6.6 kN/m , 极限抗拉强度对应的延伸率 ϵ_{\max} 为 19.0% , 5% 割线模量为 40 kN/m , 套筒接缝处的强度与土工材料的强度较为一致。

(5) 成桩完成后, 在地基表面铺设 2 cm 厚的褥垫层, 选用粒径为 $0.90 \sim 2.0 \text{ mm}$ 的砾砂。然后在复合地基中心位置布置承压板, 并安装结构。

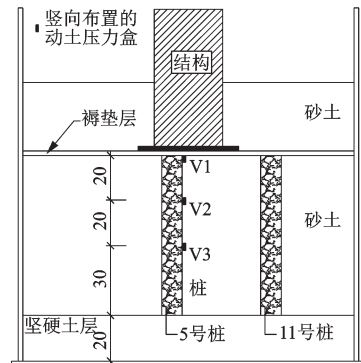
1.3 传感器布置

在桩体内距桩顶 $0, 20$ 和 40 cm 布置动土压力盒 H1~H3, 用于采集桩体内轴向动应力响应, 动土压力盒布测点如图 5(a) 所示, 图 6 所示为安设桩顶

动土压力盒。沿桩侧距桩顶 $0, 20$ 和 40 cm 竖向布置动土压力盒 V1~V3, 监测土体施加给桩体的水平剪切应力, 如图 5(b) 所示。



(a) 1-1断面



(b) 2-2断面

单位: cm

图 5 传感器布置

Fig.5 Arrangement of sensors

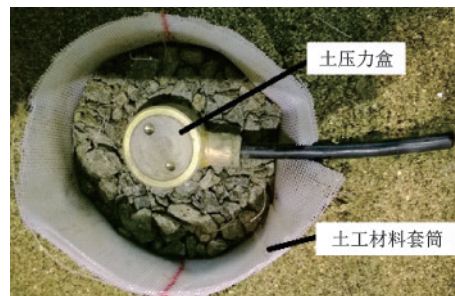


图 6 埋设桩顶动土压力盒

Fig.6 Installing the dynamic pressure cell on the column head

1.4 加载地震波

将制作好的模型静置 24 h 后, 在模型底部输入 El Centro 波 (EL)、汶川清平波 (QP) 和 Kobe 波 (KB)。先按时间相似比对原始地震波的持时进行压缩, 再按采样频率进行内插, 得到所需输入波, 如图 7 所示。依次输入相同峰值的 EL、QP、KB 地震

波,加速度峰值依次为:0.1g、0.2g、0.4g、0.6g、0.9g,每一等级峰值输入前,先输入0.05g的白噪声,检测模型的动力性质。在X和Z方向同时加载相同的地震波,Z方向施加的加速度幅值乘以系数0.7。

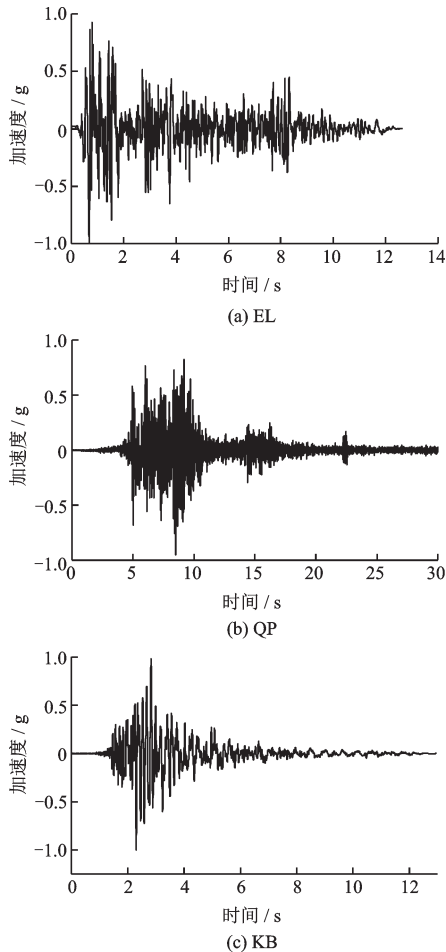


图7 加速度时程曲线

Fig.7 Acceleration time history curves

2 试验结果分析

地震波通过底部土层、复合地基、褥垫层传递至上部结构,引起结构的振动;反过来,上部结构振动引起的惯性力也作用于复合地基上。在地震作用下,包裹碎石桩复合地基中桩-土由于运动的不一致性产生相互作用。为了研究包裹碎石桩的动应力特点,分析不同地震波作用下包裹碎石桩轴向动应力,桩-土水平动应力的响应规律,探讨包裹碎石桩轴向动应力和水平动应力的响应机理。

2.1 桩身轴向动应力

利用动土压力盒监测地震作用引起的桩-土应

力变化,在进行地震激励前,先对土压力值进行清零。图8为0.4g Kobe(KB)地震波作用下包裹碎石桩不同位置的轴向应力时程曲线。由图可发现,地震作用使桩体内不同位置应力在零上下波动,最后存在一定的残余应力。这说明在地震作用过程中,桩体承受再挤压和松弛反复作用,且在地震结束后,桩体内应力相比初始状态发生了变化。

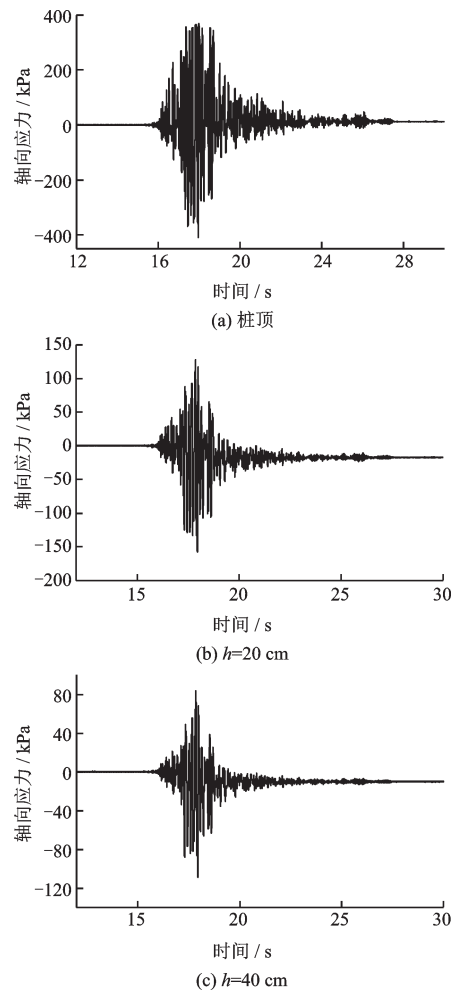


图8 包裹碎石桩轴向动应力时程曲线(0.4g KB波作用下)
Fig.8 Axial stress time history curves of the geosynthetic encased stone column (input KB of peak 0.4g)

在同一峰值、类型地震波作用下,取包裹碎石桩桩身应力时程曲线的最大值,计算得到桩身其它位置的最大动应力与桩顶最大动应力的百分比 N_z/N_0 ,动应力百分比沿桩身分布情况如图9所示,由图可知,在某一地震波作用下,动应力由桩顶往下均迅速衰减,如在0.1g~0.4g EL、QP和KB波作用下,动应力由桩顶传递至桩顶以下20 cm时,动应力减小60%~85%;由文献[27]可知在静力作用

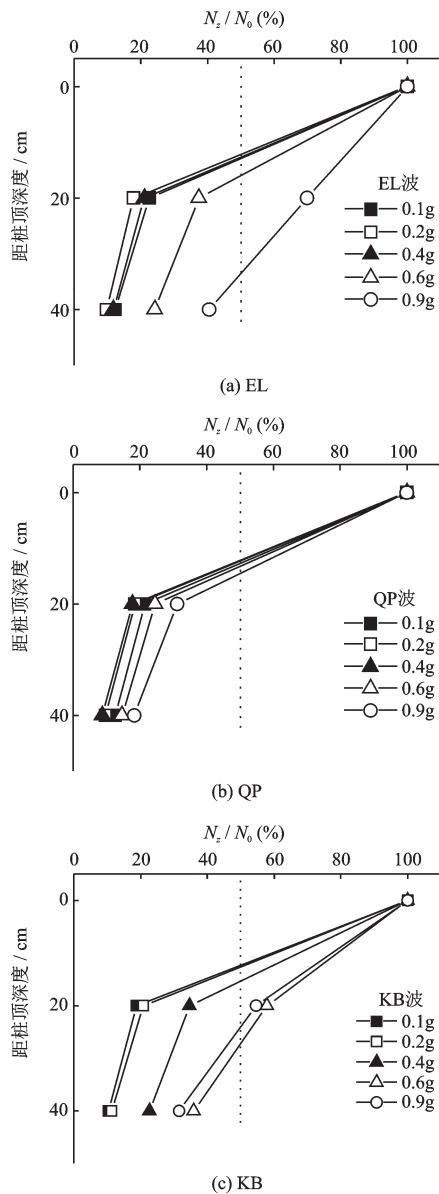


图9 动应力百分比沿包裹碎石桩分布情况

Fig.9 Dynamic stress ratio distribution along the geosynthetic encased stone column

下,包裹碎石桩桩顶力传递至桩顶以下 20 cm 时,动应力几乎无变化;这表明地震作用下动应力沿桩身的衰减速度远快于静力下桩身轴力的减小速度,这可能是因为在地震作用下,桩-土相互作用更强烈。

由上述分析可知,包裹碎石桩在桩顶位置的轴向应力较大,这也表明该位置较易发生破坏。在 EL、QP 和 KB 波作用下,包裹碎石桩和碎石桩桩顶最大应力随输入加速度峰值的变化曲线如图 10 所示。由图可发现,在不同峰值加速度作用下,包裹碎石桩内轴向应力绝对值均大于碎石桩的,这是因

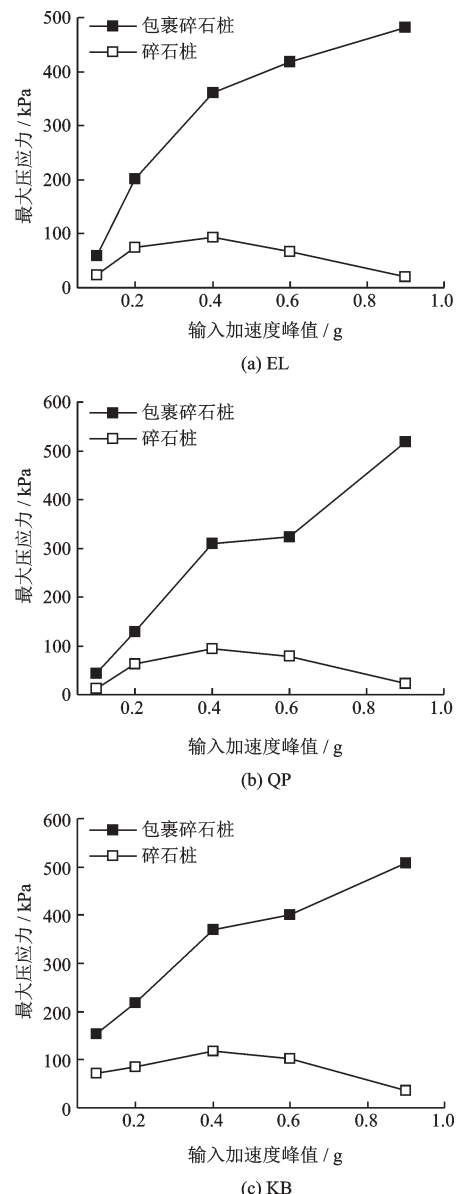


图10 包裹碎石桩桩顶最大轴向应力

Fig.10 Maximum axial stress of the geosynthetic encased stone column head

为包裹碎石桩有套筒的约束,桩体刚度较大,因此较大的动应力集中到桩顶。不同地震波作用下,包裹碎石桩桩顶的轴向应力均先随输入加速度峰值的增大而增大;当加速度峰值大于或等于 0.4g 时,包裹碎石桩桩顶轴向应力的增大速度减小。而对于碎石桩而言,当加速度峰值为 0.1g~0.4g 时,碎石桩桩顶的轴向应力随加速度峰值的增大先增大,但当加速度峰值为 0.6g、0.9g 时,随着加速度峰值的增大桩顶轴向应力减小,这可能是因为 0.4g KB 波作用下,碎石桩在振动过程中桩顶部受到了损坏,导致其刚度降低,试验完成以后,开挖出桩体,也发

现碎石桩损毁严重。

2.2 桩侧水平动应力

沿桩体一侧竖向布置动土压力盒,采集0.4g EL、QP和KB波作用下包裹碎石桩一侧由振动引起的水平应力如图11所示。由图可见,水平应力在零上下波动,在地震激励完成后,存在一定的水平应力残余值。这说明由于地震作用,桩体承受水平剪切作用,且在地震波结束后,桩体内应力相比初始值发生了改变。另外,不同地震波作用下,产生的残余水平应力方向不同,这是因为桩位的布置在地震作用方向上不对称,地震波不对称,且不同地震波强度较大的方向不一致,故导致应力累积的方向不一致。

分别取0.1g、0.2g、0.4g EL、QP、KB地震波作用下,桩侧水平应力时程曲线的最大值,作包裹碎石桩和碎石桩桩侧最大水平应力分布如图12所示。

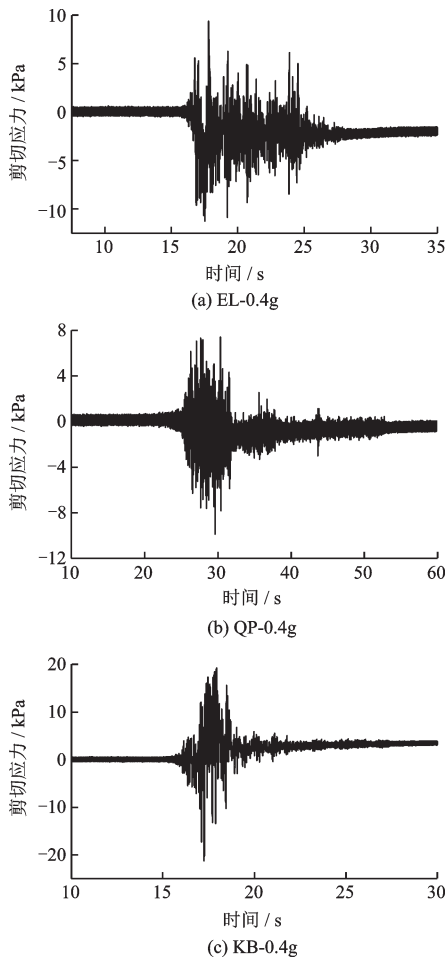


图11 包裹碎石桩桩顶剪切应力时程曲线

Fig.11 Shear stress time history curves of the geosynthetic encased stone column head

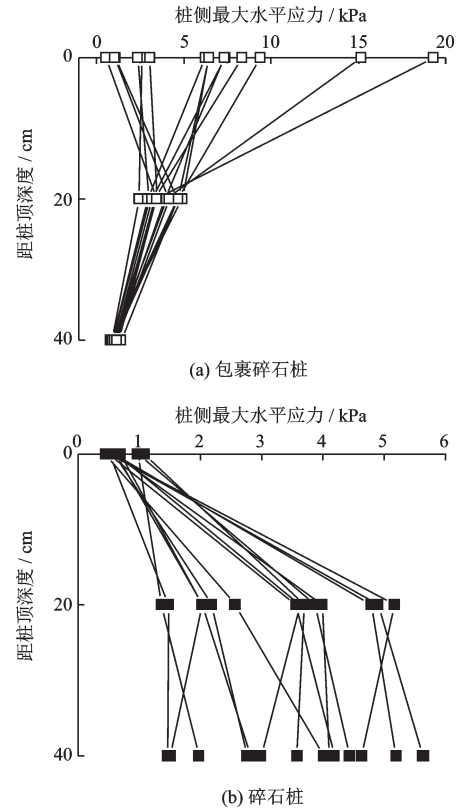


图12 桩侧最大水平应力

Fig.12 Maximum horizontal stress along the piles

由图可知:

(1)包裹碎石桩桩侧水平应力呈现出随深度减小的趋势;桩顶最大水平应力较大,最大值可达16 kPa;这是因为桩体上部围压应力较小,桩、土之间不够紧密,故桩、土之间产生的运动相互作用较大。在40 cm深度,包裹碎石桩的桩侧水平应力接近零。

(2)碎石桩桩顶最大水平应力较小,几乎为零。因为碎石桩为散体材料桩,对周围土体的依赖性较大,而桩顶部土体提供的围压应力较小,故桩顶部刚度较小,桩顶部碎石和土体一起运动,相互作用较小。当深度较大时,桩周土体提供的围压应力增大,桩体刚度增大,桩、土之间的相互作用增大。

由上述分析可知,包裹碎石桩桩顶及其以下20 cm深度的水平应力较大,故作包裹碎石桩桩顶及其20 cm深度的最大水平应力随输入加速度峰值的变化曲线如图13所示。由图可发现,在不同类型的地震波作用下,随着输入加速度峰值的增大,桩顶水平应力均先增大,在0.4g地震波输入时达到最大值,之后水平应力减小,在0.9g EL、QP和KB作用下,水平应力几乎为零,这表明包裹碎石桩桩顶的

抗剪强度有所降低。

对于桩顶以下 20 cm 深度,随着加速度峰值的增大(0.6g~0.9g),桩侧水平应力先略增大,之后趋于稳定。

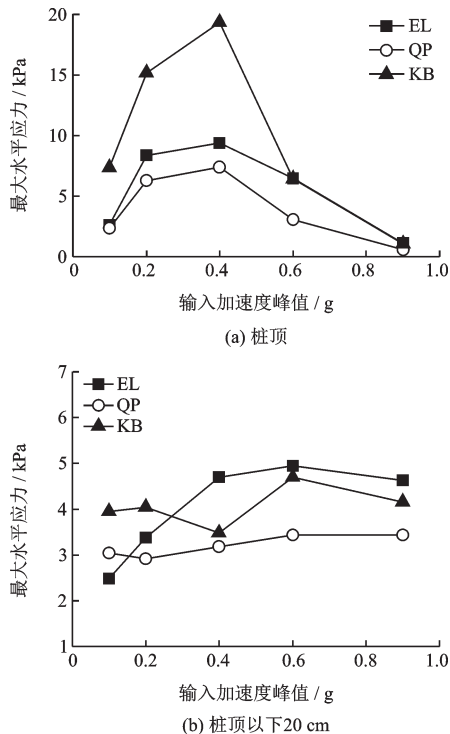


图 13 包裹碎石桩桩身最大水平应力随输入加速度峰值的变化曲线

Fig.13 Curves of the maximum horizontal stress of geosynthetic encased stone column versus the peak value of input acceleration

3 结 论

(1)在某一地震波作用下,取轴向动应力时程曲线的最大值,发现该最大轴向应力沿包裹碎石桩向下迅速衰减。

(2)包裹碎石桩上部承受的剪切应力较大,而碎石桩在中下部承受的剪切应力较大。其差异主要是因为土工材料的加筋作用提高了包裹碎石桩的抗剪强度,使得包裹碎石桩上部能承受较大的水平剪切力;而碎石桩受到的土体约束作用随深度增大,相应地,其抗剪强度随深度增大。

(3)在同一类型地震波作用下,随着输入加速度峰值的增大,包裹碎石桩桩顶水平应力均先增大,在0.4g地震波输入时达到最大值,之后随输入加速度峰值的增大,水平应力减小,表明桩顶的抗剪强度有所降低。

参 考 文 献:

- [1] 崔激, 张志耕, 闫澍旺. 碎石桩联合土工格栅复合地基处理湿地软基的机制研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(6): 1764-1768.
Cui W, Zhang Zh G, Yan Sh W. Mechanism of composite ground with stone columns and geogrid in wetland [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(6): 1764-1768. (in Chinese)
- [2] Van Impe W F. Soil improvement techniques and their evolution[R]. Rotterdam: Balkema, 1989.
- [3] Raithel M, Kirchner A, Schade C, et al. Foundation of constructions on very soft soils with geotextile encased columns - State of the art[C]//Innovations in Grouting and Soil Improvement, Austin: Geotechnical Special Publication, 2005: 1-11.
- [4] Kempfert H G, Raithel M. Experiences on Dike Foundations and Land Fills on Very Soft Soils[C]//International Symposium on Soft Soils Foundation Engineering, Mexico: [s. n.], 2002: 176-181.
- [5] 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.
Ou Y F, Zhang J J, Fu X, et al. Experimental analysis on the bearing behavior of geosynthetic encased stone columns[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(7): 1929-1936. (in Chinese)
- [6] 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.
- [7] Gniel J, Bouazza A. Improvement of soft soils using geogrid encased stone columns [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2009, 27(3): 167-175.
- [8] Murugesan S, Rajagopal K. Shear load tests on stone columns with and without geosynthetic encasement [J]. Geotech Test, 2009, 32(1): 35-44.
- [9] Dash S K, Bora M C. Influence of geosynthetic encasement on the performance of stone columns floating in soft clay [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2013, 50(7): 754-765.
- [10] 欧阳芳, 张建经, 韩建伟, 等. 包裹碎石群桩模型试验分析[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2015, 45(5): 952-957.
Ouyang F, Zhang J J, Han J W, et al. Model test analysis on group of geosynthetic encased stone columns [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2015, 45(5): 952-957. (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 column [J]. China Journal of highway and transport, 2015, 28(9): 1-8. (in Chinese)
- [12] 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 Ch, 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)
- [13] Almeida M S S, Hosseinpour I, Riccio M, et al. Behavior of geotextile-encased granular columns supporting test embankment on soft deposit[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2014, 141(3): 1-9.
- [14] Yoo C. Performance of geosynthetic-encased stone columns in embankment construction: numerical investigation[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2010,136(8): 1148-1160.
- [15] Gu M, Han J, Zhao M. Three-dimensional DEM analysis of single geogrid-encased stone columns under unconfined compression: a parametric study [J]. Acta Geotechnica, 2017, 12(3): 559-572.
- [16] Gu M, Han J, Zhao M. 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.
- [17] 赵明华,何玮茜,衡帅,等.基于圆孔扩张理论的筋箍碎石桩承载力计算方法研究[J].岩土工程学报,2017,39(10):1785-1792.
Zhao M H, He W X, Heng Sh, et al. Calculation method of geogrid-encased stone columns' bearing capacity based on cavity expansion theory[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(10): 1785-1792. (in Chinese)
- [18] Zhang Y P, Li T, Wang Y. Theoretical elastic solutions for foundations improved by geosynthetic-encased columns[J]. Geosynthetics International, 2011, 18(1): 12-20.
- [19] 王纯子,陈昌富,赵阳.顶部加箍碎石桩极限承载力上限分析[J].岩土力学,2015,36(6):1801-1806.
Wang Ch Z, Chen Ch F, Zhao Y. Upper-bound limit analysis of ultimate bearing capacity of upper geosynthetic-encased stone column [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015,36(6):1801-1806. (in Chinese)
- [20] Zhang Y, Chan D, Wang Y. Consolidation of composite foundation improved by geosynthetic-encased stone columns [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2012, 32: 10-17.
- [21] Castro J, Sagaseta C. Deformation and consolidation around encased stone columns[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2011, 29(3): 268-276.
- [22] Tang L, Cong S, Ling X, et al. Numerical study on ground improvement for liquefaction mitigation using stone columns encased with geosynthetics[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2015, 43(2): 190-195.
- [23] 欧阳芳,张建经,韩建伟,等.包裹碎石桩和碎石桩复合地基抗震性能对比试验研究[J].岩土力学,2016,37(4):998-1012.
Ou Y F, Zhang J J, Han J W, et al. Comparison on aseismic behavior of composite foundation with ge-encased stone columns and stone columns [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016,37(4): 998-1012. (in Chinese)
- [24] Bockingham E. Illustrations of the use of dimensional equations [J]. On physically similar systems, 1914, 4(4): 345-376.
- [25] 欧阳芳.包裹碎石桩复合地基静动力特性及其设计方法研究[D].成都:西南交通大学,2017.
Ou Y F. Studies on the behavior and design methods for geosynthetic encased stone columns composite ground under static and dynamic conditions [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017. (in Chinese)
- [26] 土工试验方法标准:GB/T 50123—1999[S].北京:中国计划出版社,1999.
Standard for soil test method:GB/T 50123—1999[S]. Beijing: China Planning Press, 1999. (in Chinese)
- [27] Ou Y F, Zhang J J, Liao W M, et al. Characteristics of the stress and deformation of geosynthetic-encased stone column composite ground based on large-scale model tests[J]. Geosynthetics International, 2016, 24(3): 242-254.

(本文责编:周小潭)