

中文核心期刊 CSCD核心期刊 中科双效期刊 中国科技核心期刊 Caj-cd规范获奖期刊

### 循环荷载下水泥土桩复合体动力参数试验研究

叶观宝,秦粮凯,张 振,郑文强,陈 勇

An experimental study of dynamic parameters of unit cell of deep mixed column-reinforced soft clay under dynamic loading YE Guanbao, QIN Liangkai, ZHANG Zhen, ZHENG Wenqiang, and CHEN Yong

在线阅读 View online: https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202103037

#### 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

## 分级循环动荷载下水泥土动力特性试验研究

An experimental study of the dynamic characteristics of cement soils subjected to staged cyclic loading 张振, 陈勇, 杨天亮, 叶观宝, 郑文强 水文地质工程地质. 2021, 48(2): 89–96

循环荷载作用下正融粉质黏土强度特征与滞回环演化规律

Strength characteristics of the melting silty clay under cyclic loading and the evolution law of hysteresis loop 崔宏环, 王文涛, 何静云, 王小敬, 金成勇, 徐磊 水文地质工程地质. 2020, 47(4): 174-182

## 排弃物料力学性质大型三轴剪切试验研究

A study of large-scale triaxial shear test of the mechanical properties of abandoned materials 刘小平, 刘天林, 曹晓毅, 张宝元, 王玉涛 水文地质工程地质. 2020, 47(4): 191-198

## 水泥改良黄土路基动力稳定性评价参数试验研究

An experimental study of the evaluation parameters of dynamic stability of the cement-improved loess subgrade 张沛云, 马学宁 水文地质工程地质. 2019, 46(2): 141-141

## 尺寸和加载速率对冻结水泥土单轴压缩影响

Effect of size and loading rate on the uniaxial compression characteristics of frozen cement soil 陈鑫, 张泽, 李东庆 水文地质工程地质. 2019, 46(6): 74-82

## 单轴压缩下红色砒砂岩水泥土的能量演化机制研究

Energy evolution mechanism of red Pisha-sandstone cement soil under uniaxial compression 耿凯强, 李晓丽 水文地质工程地质. 2020, 47(5): 134-141



关注微信公众号,获得更多资讯信息

#### DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202103037

叶观宝,秦粮凯,张振,等. 循环荷载下水泥土桩复合体动力参数试验研究 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(1): 48-56. YE Guanbao, QIN Liangkai, ZHANG Zhen, *et al.* An experimental study of dynamic parameters of unit cell of deep mixed column-reinforced soft clay under dynamic loading[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(1): 48-56.

# 循环荷载下水泥土桩复合体动力参数试验研究

叶观宝<sup>1,2</sup>,秦粮凯<sup>1,2</sup>,张 振<sup>1,2</sup>,郑文强<sup>1,2,3</sup>,陈 勇<sup>1,2</sup>

 (1. 同济大学土木工程学院地下建筑与工程系,上海 200092;2. 同济大学岩土及地下工程教育部 重点实验室,上海 200092;3. 上海勘察设计研究院(集团)有限公司,上海 200093)

摘要:水泥土桩被广泛应用于软土路基加固工程中。然而,人们对水泥桩与桩间土形成的加固体的动力特性尚缺乏认识, 无法合理评价水泥土桩复合地基的长期性能。基于此,本文开展水泥土桩复合体大型动三轴试验,研究围压、静偏应力、 置换率及分级加卸载路径对其动力参数的影响,并分析了动力参数的波动性。试验结果表明:随着静偏应力增加,复合单 元体的动弹模量减小,阻尼比增大,临界动应力比减小。随着置换率增加,动弹模量略有增加,阻尼比略有减小。逐级卸载 造成复合单元体的动力参数劣化。阻尼比具有较强的波动性,复合单元体阻尼比的变异系数是动弹模量的 2.8~7.0 倍。相 比于软土,复合体动弹模量提高了 2~6 倍,静偏应力越大,提高系数越大。 关键词:水泥土桩复合体;循环荷载;大型三轴;动弹性模量;阻尼比 中图分类号:TU411.8; TU411.93 文献标志码:A 文章编号: 1000-3665(2022)01-0048-09

## An experimental study of dynamic parameters of unit cell of deep mixed column-reinforced soft clay under dynamic loading

YE Guanbao<sup>1,2</sup>, QIN Liangkai<sup>1,2</sup>, ZHANG Zhen<sup>1,2</sup>, ZHENG Wenqiang<sup>1,2,3</sup>, CHEN Yong<sup>1,2</sup> (1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of

Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. SGIDI Engineering Consulting (Group) Co. Ltd., Shanghai 200093, China)

**Abstract:** Composite soil with deep mixed column is widely used in strengthening soft soil subgrade. However, there is still a lack of understanding the dynamic characteristics of composite soil with deep mixed column and evaluating unreasonably the long-term performance of composite soil with deep mixed column. Based on above, this study conducted a series of large-scale triaxial test to investigate the influence factors of static deviator stress, replacement ratio and incremental loading/unloading on the dynamic parameters of unit cell of deep mixed column-reinforced soft soil. The results show that with the increase of the static deviator stress, the dynamic elastic modulus increases, the damping ratio decreases, and the critical dynamic stress ratio decreases. With the increase of the area replacement ratio, the dynamic elastic modulus increases slightly and the damping ratio decreases slightly. The staged unloading can deteriorate the dynamic properties of the unit cell. The damping ratio is of strong volatility, and the variation coefficient of damping ratio is 2.8 to 7.0 times that of the dynamic elastic

收稿日期: 2021-03-10; 修订日期: 2021-04-02 投稿网址: www.swdzgcdz.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(41772281;41972272)

第一作者: 叶观宝(1964-), 男, 工学博士, 教授, 主要从事软土地基处理技术及理论研究。E-mail: ygb1030@126.com

通讯作者: 张振(1984-), 男, 工学博士, 副教授, 主要从事软基处理与教学科研工作。E-mail: zhenzhang@tongji.edu.cn

modulus. The dynamic elastic modulus of the unit cell of the composite soil is 2 to 6 times that of the soft soil, and the improvement factor increases with the increase of the static deviator stress.

**Keywords**: composite soil with deep mixed column; cyclic loading; large-scale triaxial test; dynamic elastic modulus; damping ratio

水泥搅拌桩被广泛应用于软土地基处理中<sup>[1]</sup>,处 理后的软土路基要承受长期往复交通荷载,因此水泥 土桩复合体的动力特性也备受关注。

叶观宝等<sup>[2]</sup>结合现场试验得出水泥土桩承载力、 基底反力、荷载传递等规律。刘松玉等<sup>33</sup>结合某高速 公路工程进行钉形水泥土桩的现场研究。叶观宝等<sup>[4]</sup> 从土体、水泥土及复合桩体单元变形模式出发对加芯 水泥土桩复合地基桩土应力比建立理论计算公式。 白顺果等<sup>[5]</sup>采用室内模型试验得出水泥土复合地基 随着循环应力比增大,沉降速率也越大。Kim 等<sup>60</sup>以 离心机动力试验模拟结构物、浅基础与结构物下水泥 土加固地基在神户地震波下动力响应进行研究,随着 振动加速度的增大,置换率24%的模型比置换率33% 先达到破坏。Liu 等<sup>[7]</sup> 对水泥土桩复合体进行单剪与 循环剪切试验。Cai等<sup>[8]</sup>、曾国红等<sup>[9]</sup>、吕程伟<sup>[10]</sup>及 Kazemian 等<sup>[11]</sup>分析了水泥土复合单元体静动力特性。 然而,目前的研究大多集中在水泥土桩复合地基的静 力特性[12-13]和水泥土的动力特性[7],对循环荷载作用 下水泥土桩复合体动力特性的研究较少。

本文利用 GCTS-STX600 大型三轴仪,开展水泥土 桩复合体大型动三轴试验,研究围压、静偏应力、置 换率及分级加卸载路径对其动力参数的影响,并分析 了动力参数的波动性。

### 1 试验方案与试样制备

1.1 试验设备及方案

试验设备包含 GDS 动三轴仪和 GCTS 大型静动 三轴仪。动三轴仪进行软土以及水泥土循环动力试 验。大型静动三轴仪主要进行水泥土桩复合体静动 力试验,如图 1 所示。GCTS 大型动静三轴试验机可 同时独立施加、改变和控制试样的轴向荷载、围压和 反压及加载速率,进行静态、动态三轴试验。试验机 可产生轴向加载频率为 0~10 Hz 的正弦波、方波、三 角波和用户自定义波形,轴向力加载精度±0.01 kN,围 压精度±0.1 kPa。

试验方案主要考虑围压、动应力分级加卸载路 径、静偏应力以及置换率对水泥土桩复合体动力特性 的影响。加载形式分为分级加载和分级卸载:分级加



图 1 GCTS 大型三轴仪 Fig. 1 GCTS large scale triaxial apparatus

载的动应力共分 5 级, 每级循环 2 500 次, 依次动应力 比为 0.25, 0.30, 0.35, 0.40, 0.45; 分级卸载动应力比次 序与之相反。软土的动强度较小, 软土动三轴试验选 用动应力比为 0.15。相关研究<sup>[14-17]</sup>表明, 交通荷载在 路基内部产生的动应力频率一般在 0.1~5 Hz, 且以 1 Hz 左右低频分量为主, 且可采用半正弦波来描述交通 荷载作用下地基土中动应力。因此, 本试验采用 1 Hz 的半正弦波来模拟交通荷载作用下地基土中的动 应力。加(卸)载示意图如图 2 所示。围压采用 40, 60, 80 kPa。试验方案见表 1。

1.2 试验材料

试验材料包括土、水泥和水。试验用粉质黏土, 密度为1.66 g/cm<sup>3</sup>, 含水率为25.0%, 液限为36.3%, 塑 限为21.2%。采用普通硅酸盐水泥(P.O 32.5)、自来 水。水泥土模型桩的直径分别选取100, 120, 140 mm。 水泥土模型桩水泥掺量10%, 水灰比取1。将制备的 水泥土浆液置于模型桩模具内振捣, 静置48h后拆 模, 并置于标准养护室浸水养护龄期60d, 测得水泥 土峰值强度为0.93 MPa。水泥土强度在实际工程典 型范围内<sup>[1-2]</sup>。

图 3 为水泥土桩复合单元体大型三轴试验试样示 意图。大三轴试验试样的直径 300 mm,高度 600 mm。 试样制作时,在大型三轴模具底层放置一层滤纸,在 模具中央放置水泥土模型桩;按含水量控制加入一定 量水并充分搅拌软土;按软土天然密度分批次称量充 分搅拌后的软土,逐层填入模具内,并压实至制定高 轴向应力

等压固结





时间

加载阶段



Fig. 2 Schematic diagram of staged cyclic loading (unloading)

	衣」	瓜知	刀采		
	Table 1	Test	scheme		
项目	试验编号	围压 /kPa	动应力比	置换率 /%	静偏应力 /kPa
水泥土桩复合体 (大型动三轴试验)	DC1	80	$0.25\sim 0.45$	11.1	5
	DC2	80	$0.25\sim 0.45$	11.1	24
	DC3	80	$0.25\sim 0.45$	11.1	32
	DC4	80	$0.25\sim 0.45$	11.1	40
	DC1	80	$0.25\sim 0.45$	11.1	5
	DC5	80	$0.25\sim 0.45$	16.0	5
	DC6	80	$0.25\sim 0.45$	21.7	5
	DC7	40	$0.25\sim 0.45$	11.1	5
	DC8	60	$0.25\sim 0.45$	11.1	5
	DC1	80	$0.25\sim 0.45$	11.1	5
	DC9	80	$0.45\sim 0.25$	11.1	5
	DC10	80	0.25 ~ 0.45	100	5
水泥土(动三轴试验)	DC11	80	$0.25\sim 0.45$	100	24
	DC12	80	$0.25\sim 0.45$	100	32
	DC13	80	$0.25\sim 0.45$	100	40
软土(动三轴试验)	DC14	80	0.15	0	5
	DC15	80	0.15	0	24
	DC16	80	0.15	0	32
	DC17	80	0.15	0	40

度;重复操作至模具内填满软土;将试样顶面刮至齐 平,铺上一层滤纸,再将加载顶盖轻轻放置在试样顶 部。制作完成的试样如图4所示。将试样置于仪器 中,在相应围压下进行固结,待体积变化稳定后(本文



图 3 水泥土桩复合单元体示意图 Fig. 3 Schematic diagram of unit cell of composite soil with DM column



Fig. 4 Specimen preparation of the GCTS large-scale triaxial test

试验采用静置 12 h)进行 GCTS 动三轴试验。

软土动三轴试验试样采用天然含水率的重塑土, 分层填入饱和器中,用击实器将土样击实,重复操作 至饱和器顶部,将试样顶面刮至齐平,静置 12 h 备 用。水泥土动三轴试验试样采用与大型动三轴试验 中水一致的水泥土浆液,分批次灌入饱和器内,沿侧 壁捣实,再将饱和器置于小型振动台上,振动 60 s 后, 重复操作至饱和器顶部,并用刮刀刮平,套上保鲜膜 静置养护 24 h 后,拆模置于标准养护室浸水养护 60 d 备用。

## 2 软土与水泥土动力参数

#### 2.1 软土的动力参数

图 5 为软土试样在不同静偏应力下动力参数随循环振动次数关系曲线。由图 5(a)可知,在不同静偏应力下,动弹模量随振次增加而减小;随静偏应力增加,动弹模量逐渐减小。静偏应力 40 kPa下,软土试样加载初期应变迅速增加至 20%,试样出现明显鼓胀破坏。由图 5(b)可知,在不同静偏应力下,阻尼比在振



图 5 不同評團应力下私工幼儿参数与循环旅入的大系 Fig. 5 Dynamic parameter vs cyclic loading times under different static deviator stresses of the soft clay

动荷载初期增加较快,而后逐渐趋于稳定。在试验静 偏应力和动应力比范围内,软土试样动弹模量稳定值 为15~70 MPa,阻尼比稳定值为0.05~0.10。试样在 40 kPa静偏应力下虽然出现鼓胀破坏,但由于试验为 应力控制,随着应变增加,试样与动荷载达到平衡状 态,动弹模量也出现显著衰减。

2.2 水泥土的动力参数

图 6 为水泥土在不同静偏应力下动力参数随循环 振动次数关系曲线。由图 6(a)可知,在不同静偏应力 下,动弹模量随振次增加略有增加;随静偏应力增加, 动弹模量逐渐增大,这可能是由于静偏应力作用一定 程度地使得试样结构性更强。由图 6(b)可知,在不同 静偏应力下,阻尼比在振动荷载初期迅速衰减,而后 逐渐趋于稳定。静偏应力为 5 kPa 时,阻尼比随动应 力增加而减小;而静偏应力为 24~40 kPa 时,阻尼比 随动应力幅值增加而增加。在试验静偏应力和动应 力比范围内,水泥土动弹模量稳定值为 100~125 MPa, 阻尼比稳定值为 0.03~0.075。

#### 3 水泥土桩复合体动力参数

3.1 围压的影响

图 7 为置换率为 11.1% 时不同围压下水泥土桩复

合体动力参数随循环振动次数的关系曲线。由 图 7(a)可知,在逐级加载情况下,围压对动弹模量影 响差异并不明显。随着动应力比增加,动弹模量略有 下降,但在相同动应力振级范围内,动弹模量随振次 变化不大,这可能是因为动应力水平相比其强度较 低。图 7(b)为不同围压下阻尼比随振次的变化曲 线。随着围压越大,同一振次下的阻尼比越小;随着 动应力幅值的增加,阻尼比略有减小。在试验围压和 动应力比范围内,动弹模量稳定值为 100~130 MPa, 阻尼比稳定值为 0.05~0.15。

#### 3.2 静偏应力的影响

图 8 为置换率为 11.1% 时不同静偏应力下水泥土 桩复合单元体动力参数随振次的变化曲线。随着静 偏应力的增加,试样动弹模量逐渐减小,而阻尼比显 著增大。静偏应力为 32 kPa 和 40 kPa、动应力比分别 为 CSR=0.40 与 CSR=0.35 时,试样出现应变陡增(试样 破坏),试样动弹模量迅速衰减,阻尼比迅速增加。可 知,随着静偏应力的增加,水泥土桩复合单元体的临 界动应力比减小。

#### 3.3 置换率的影响

图 9 为围压 80 kPa 和静偏应力 5 kPa 时不同置换 率下水泥土桩复合单元体动弹模量与阻尼比随振动





Fig. 6 Dynamic parameter vs cyclic loading times under different static deviator stresses of the composite soil with deep mixed column





Fig. 7 Dynamic parameter vs cyclic loading times under different confining pressures

次数的变化曲线。随着置换率从 11.1% 增加至 21.7%, 试样的动弹模量略有增加, 阻尼比略有减小。Chai 等<sup>[8]</sup> 研究结果也表明, 置换率在 5%~20% 范围, 小应变 (10<sup>-4</sup>)情况下提高置换率可提高水泥土桩复合体动弹 模量, 但随着应变的增加, 两者的动弹模量逐渐趋于 一致。这可能是因为水泥土桩复合单元体的动力特 性受到水泥土和桩间软土的共同影响。试验中,虽然 增加了水泥土桩置换率,但软土的占比仍较大。

3.4 动应力分级加卸载的影响

图 10 为置换率为 11.1% 时分级加卸载情况下动





弹模量与阻尼比随振次变化曲线。加卸载情况下,动 弹模量稳定值为100~120 MPa,阻尼比稳定值为0.05~ 0.075。但相同振次下,相比于分级加载,分级卸载的 动弹模量略小,阻尼比略大。这可能是因为分级卸载 第一级动应力幅值较大,试样内部在振动过程早期出 现了裂缝,并随振动次数增加不断发展,造成复合单 元体的动力参数劣化。

## 4 动力参数讨论与分析

#### 4.1 动力参数波动性分析

由试验结果可知,在循环荷载下,土、水泥土和水 泥土桩复合单元体的动力参数集中在一定范围内波 动。为研究试样动力参数的波动性,选取每级动应力 下最后 500 次,即应变稳定后的动力参数进行分析。 通过正态分布验证(图 11)表明,动力参数服从正态分



图 10 动应力分级加卸载下动力参数与循环振次的关系

Fig. 10 Dynamic parameter vs cyclic loading times under different static deviator stresses under staged loading/unloading



Fig. 11 Verification of normal distribution

布。据此计算出各组试验动力参数的均值、标准差和 变异系数,并分析土、水泥土和水泥土桩复合单元体 的动力参数波动程度。

图 12 为不同静偏应力下软土、水泥土和水泥土 桩复合单元体动力参数变异系数计算结果。软土、水 泥土和水泥土桩复合单元体,三者动弹模量变异系数 分别为0.61%~5.36%、0.40%~0.82%和1.08%~1.73%, 三者阻尼比的变异系数分别为4.21%~12.37%、2.21%~ 4.87%和3.55%~7.97%。三者动弹模量的变异性均小 于阻尼比,即阻尼比波动性更明显。水泥土和水泥土 桩复合单元体的动力参数变异性要小于软土,即软土 的动力参数波动性更明显。本试验置换率和静偏应 力范围内,其对软土、水泥土和水泥土桩复合单元体 的动力参数变异系数的影响规律不明确。

4.2 动力参数对比

表 2 归纳了试验中软土、水泥土和水泥土桩复合 单元体动力参数的上下限范围,造成试样破坏的动应 力比阶段除外。从表 2 中可知,三者的动弹模量差异



Fig. 12 Coefficient of variation of dynamic parameter of different materials under different static deviator stresses

较大,阻尼比差异较小。图 13 为三者动力参数对比 直方图。随着静偏应力增加,软土的动弹模量逐渐减 小,呈软化状态;水泥土的动弹模量逐渐增加,呈硬化 状态;复合体的动弹模量略有减小。对于复合体,动 弹模量随着置换率增加而增加。相比于软土,复合体 动弹模量提高了 2~6倍,静偏应力越大,提高系数 越大。

## 表 2 不同材料的动力参数取值范围 Table 2 Value ranges of dynamic elastic modulus of different materials

		-			
试验材料	·바까스바 중	动力参数			
	试验内谷	动弹性模量Er/MPa	阻尼比Dr		
软土	静偏应力-5kPa	53 ~ 70	0.056 ~ 0.070		
	静偏应力24kPa	$30 \sim 60$	$0.064 \sim 0.068$		
	静偏应力-32kPa	$25 \sim 455$	$0.084 \sim 0.090$		
	静偏应力-40kPa	$15 \sim 25$	$0.086 \sim 0.093$		
复合体m=11.1%	静偏应力-5kPa	$100 \sim 22$	0.050 ~ 0.079		
	静偏应力24kPa	$95 \sim 120$	$0.056\sim 0.075$		
	静偏应力-32kPa	$100 \sim 115$	$0.062\sim 0.085$		
	静偏应力-40kPa	90~110	$0.065 \sim 0.100$		
复合体m=16.0%	静偏应力-5kPa	110 ~ 125	0.052 ~ 0.075		
复合体m=21.7%	静偏应力-5kPa	120 ~ 135	$0.027 \sim 0.059$		
水泥土	静偏应力-5kPa	$100 \sim 108$	$0.032 \sim 0.075$		
	静偏应力24kPa	$110 \sim 120$	$0.039 \sim 0.069$		
	静偏应力32kPa	114 ~ 123	$0.049 \sim 0.054$		
	静偏应力-40kPa	118~126	0.040 ~ 0.055		



Fig. 13 Dynamic elastic modulus of different materials under different static deviator stresses

## 5 结论

(1)随着静偏应力增加,复合单元体动弹模量减小,阻尼比增大,临界动应力比减小。随着置换率增加,动弹模量略有增加,阻尼比略有减小。逐级卸载会造成复合单元体的动力参数劣化。

(2)软土、水泥土和水泥土桩复合单元体的动力 参数的波动性均符合正态分布。三者动弹模量的变 异性均小于阻尼比,复合单元体阻尼比的变异系数是 动弹模量的2.8~7.0倍。水泥土和水泥土桩复合单元 体的动力参数变异性要小于软土。

(3)随着静偏应力增加,软土呈软化状态,水泥土 呈硬化状态,复合体呈轻微软化状态。相比于软土, 复合体动弹模量提高了2~6倍,静偏应力越大,提高 系数越大。

#### 参考文献(References):

- [1] 黄春霞, 韩爱民, 隋志龙, 等. 水泥土搅拌桩复合地基 承载力的确定[J]. 水文地质工程地质, 2009, 36(3): 99-102. [HUANG Chunxia, HAN Aimin, SUI Zhilong, et al. Determination of bearing capacity for composite foundation of cement-soil mixing piles[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2009, 36(3): 99 - 102. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 叶观宝,叶书麟.水泥土搅拌桩加固软基的试验研究
  [J].同济大学学报(自然科学版), 1995, 23(3): 270 275. [YE Guanbao, YE Shulin. Field study of improved soft soil by cement-soil mixed piles[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 1995, 23(3): 270 275. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 刘松玉,朱志铎,席培胜,等.钉形搅拌桩与常规搅拌 桩加固软土地基的对比研究[J].岩土工程学报, 2009, 31(7):1059-1068. [LIU Songyu, ZHU Zhiduo, XI Peisheng, et al. Comparison between T-shaped deep mixing method and traditional deep mixing method for soft ground improvement[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(7): 1059-1068. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 叶观宝,蔡永生,张振.加芯水泥土桩复合地基桩土应 力比计算方法研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(3): 672 678. [YE Guanbao, CAI Yongsheng, ZHANG Zhen. Research on calculation of pile-soil stress ratio for composite foundation reinforced by stiffened deep mixed piles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(3): 672 678. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 白顺果,侯永峰,张鸿儒.循环荷载作用下水泥土桩复合地基的临界循环应力比和永久变形分析[J].岩土 工程学报,2006,28(1):84-87. [BAI Shunguo, HOU Yongfeng, ZHANG Hongru. Analysis on critical cyclic stress ratio and permanent deformation of composite foundation improved by cement-soil piles under cyclic loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(1):84 - 87. (in Chinese with English abstract)]
- [6] KIM A R, CHANG I, CHO G C, et al. Strength and dynamic properties of cement-mixed Korean marine clays[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2018, 22(4): 1150 – 1161.
- [7] LIU F Y, ZHU K, HU X Q, et al. Experimental simple

shear study of composite soil with cemented soil core[J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2019, 37(8): 960 – 971. DOI:10.1080/1064119X.2018.1513614.

- [8] CAI Y Q, LIANG X. Dynamic properties of composite cemented clay[J]. Journal of Zhejiang University Science, 2004, 5(3): 309 – 316.
- [9] 曾国红,白晓红,张卫平,等. 增强体复合土动弹性模 量影响因素的研究[J]. 水利学报, 2009, 40(5): 576 – 582. [ZENG Guohong, BAI Xiaohong, ZHANG Weiping, et al. Experimental study on factors influencing the dynamic elastic modulus of composite soil with different reinforcements[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(5): 576 – 582. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 吕程伟.水泥土动力特性的共振柱试验研究[D].武 汉:湖北工业大学, 2016. [LYU Chengwei. Resonant column experimental study on dynamic properties of cemented clay[D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2016. (in Chinese with English abstract)]
- [11] KAZEMIAN S, HUAT B B K, MOAYEDI H. Undrained shear characteristics of tropical peat reinforced with cement stabilized soil column[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2012, 30(4): 753 – 759.
- [12] CAI Y, XU L R, LIU W Z, et al. Field Test Study on the dynamic response of the cement-improved expansive soil subgrade of a heavy-haul railway[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2020, 128; 105878.

- [13] CHAI J C, SHRESTHA S, HINO T. Failure of an embankment on soil-cement column –improved clay deposit: investigation and analysis[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2019, 145(9): 05019006.
- [14] 温日琨,王常晶,陈云敏.交通荷载引起的静偏应力对 饱和软粘土变形影响[J]. 岩土力学,2009,30(增刊 2):119-122. [WEN Rikun, WANG Changjing, CHEN Yunmin. Effect of traffic loading induced static deviator stress on deformation of saturated soft clay[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(Sup2): 119 - 122. (in Chinese with English abstract)]
- [15] HYODO M, YASUHARA K. Analytical procedure for evaluation pore water pressure and deformation of saturated clay ground subjected to traffic loads[J]. Numerical Methods In Geomechanics, 1988, 6(1): 653 – 658.
- [16] ZHUANG Y, LI S B. Three-dimensional finite element analysis of arching in a piled embankment under traffic loading[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2015, 8(10): 7751 – 7762.
- [17] PHAM H V, DIAS D, DUDCHENKO A. 3D modeling of geosynthetic-reinforced pile-supported embankment under cyclic loading[J]. Geosynthetics International, 2020, 27(2): 157 – 169.

编辑:张明霞