

桩-震陷土层耦合作用下变截面单桩动力响应

冯忠居¹, 王逸然¹, 蔡杰², 张聪¹, 朱继新³, 孟莹莹⁴

(1. 长安大学公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 福建省交通建设质量安全中心, 福建 福州 350001;
3. 厦门路桥工程投资发展有限公司, 福建 厦门 361026; 4. 河南交院工程技术集团有限公司, 河南 郑州 450046)

摘要: 为研究不同类型地震波作用下大直径变截面钢管混凝土复合单桩的动力响应规律, 依托厦门第二东通道翔安大桥工程, 通过室内振动台试验, 选取地震动强度为 0.15g 的 5010 波、1004 波、Kobe 波及 El-Centro 波, 研究大直径变截面钢管混凝土复合单桩的桩身加速度、水平位移、弯矩及桩基损伤等变化规律。试验结果表明: 不同类型地震波由于其频谱特性不同, 大直径变截面钢管混凝土复合单桩的动力响应特性存在差异; 桩顶加速度最大值、桩顶水平位移最大值、桩身弯矩最大值均在 1004 波作用下最大, 在 Kobe 波作用下最小; 桩身弯矩最大值均未超过桩基设计抗弯承载力; 在地震力的作用下对桩基础的抗弯承载能力进行设计时, 应重点考虑软硬土层的分界面处抗弯能力。

关键词: 大直径变截面桩; 振动台试验; 震陷场地; 动力响应

中图分类号: TU473.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-4523(2025)01-0162-10

DOI: 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2025.01.018

Dynamic response characteristics of large diameter variable section single pile under the coupling action of pile-splinter soil layer

FENG Zhongju¹, WANG Yiran¹, CAI Jie², ZHANG Cong¹, ZHU Jixin³, MENG Yingying⁴

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. Fujian Provincial Transportation Construction Quality and Safety Center, Fuzhou 350001, China; 3. Xiamen Road and Bridge Engineering Investment and Development Co., Ltd., Xiamen 361026, China; 4. Henan Jiaoyuan Engineering Technology Group Co., Ltd., Zhengzhou 450046, China)

Abstract: In order to investigate the dynamic response law of concrete-filled steel tubular composite single pile with large diameter and variable section under different types of seismic waves, 5010 wave, 1004 wave, Kobe wave and El-Centro wave with ground motion intensity of 0.15g were selected through indoor shaking table test relying on Xiang'an Bridge project of Xiamen Second East Passage. The pile acceleration, horizontal displacement, bending moment and pile foundation damage of large diameter variable section concrete filled steel tube composite pile are studied. The test results show that the dynamic response characteristics of large diameter variable section concrete filled steel tube composite pile are different due to the different spectral characteristics of different seismic waves. Pile top acceleration maximum, pile top horizontal displacement maximum and pile bending moment maximum are the maximum under 1004 wave, and the minimum under Kobe wave. The maximum bending moment of pile body did not exceed the designed flexural bearing capacity of pile foundation. In the design of flexural bearing capacity of pile foundation under the action of earthquake force, the design of flexural bearing capacity at the interface of soft and hard soil layer is emphasized.

Keywords: large diameter variable section piles; shaker test; collapse site; dynamic response

变截面桩基础因具有稳定性好、适应性较强的特点被应用于跨海大桥工程建设^[1-6]。近年来, 桩基础的研究大多在直桩方面, 而对变截面桩的研究较少, 特别是桥梁变截面桩基础的动力响应问题。此外, 跨海大桥的桩基础大多穿越淤泥等软弱土层时, 在地震力作用下会产生土层震陷等问题, 从而影响

桩基础的稳定性^[7-8]。

针对软土震陷, 国内外学者开展了一些研究。DUMAS 等^[9]、LEE 等^[10]提出软土地基震陷主要是由上部单元的累计偏应变造成的, 可用静力结合的静模量软化法进行估算, 通过用等价线性模型计算上单元的动应变过程, 用应力循环次数表示地震强

收稿日期: 2022-10-20; **修订日期:** 2023-01-11

基金项目: 福建省交通科技攻关项目(JXFZ2020-XM0189); 海南省交通科技项目(HNZXY2015-045R); 国家自然科学基金青年科学基金资助项目(4190070568)

度来确定震后每个上单元的静软化模量,以此来估算震陷。郁寿松等^[11]、石兆吉等^[12]提出了影响软土震陷的因素及表现形式。王建华等^[13-14]通过饱和软黏土动三轴试验,提出了软土地基震陷计算方法,可体现软土动力的弱化特征,并应用于条形基础的震陷分析中。

针对变截面桩基础的承载特性问题,相关学者开展了一些研究。李丹等^[15]通过开展变截面桩的静载试验,分析了变截面桩的受力变形,研究了变截面桩在水平向及竖向的承载特性。胡文韬等^[16]提出了水平受荷下变截面桩基础内力及变形的算法,并通过现场实测、数值模拟证明了该方法的正确性,分析了不同因素对桩基的影响规律。崔允亮等^[17]利用分布式光纤开展现场试验和ABAQUS仿真分析,进行大直径变截面桩的承载特性研究。周杨等^[18]分析了变截面桩基础的承载特性,并比较了变截面桩与等截面桩之间的差异。方焘等^[19]基于模型试验,研究了大直径变截面桩的承载特性及破坏形式,分析了P-S曲线、桩侧摩阻力的分布等。

针对桥梁桩基础动力响应特性的研究,国内外学者通过数值仿真和室内试验开展了大量研究,并取得了许多重要研究成果。GOH等^[20]采用有限元模拟方法,对软土地基桩基础在远场地震作用下的动力响应进行了研究,并采用回归分析法对研究结果进行处理。GARALA等^[21]、KANEDA等^[22]、YAN等^[23]基于离心机振动台试验,分析了强震区桩基动力响应特性,并通过FLAC 3D程序进行数值仿真,将结果与试验进行相互验证。KUMAR等^[24]采用振动台试验,研究了El-Centro波作用下模型的动力加速度、位移和固有频率的影响因素。田兆阳等^[25-26]通过振动台模型试验,分析了软土的震陷特性及单桩负摩阻力的分布规律,研究了地震作用下软土地基单桩的动力响应特性。沈婷等^[27]、张磊等^[28]基于有效应力理论分析,建立地震作用下有限元数值模型,着重分析了桩基础的加速度、弯矩及孔压比等变化规律。程学磊等^[29]开展了处于软土地基单桩振动台试验,研究了地震对软土地基单桩的影响。冯忠居等^[30-33]、刘闯等^[34]通过进行大型振动台试验分析并研究了不同地震作用下桩基础的动力响应变化规律。许成顺等^[35]、张健等^[36]、李雨润等^[37]通过开展振动台试验研究了液化条件下桩-土的动力响应。冯忠居等^[38-39]、张聪等^[40]基于工程实例,结合振动台试验,从时程响应的角度分析了不同地震作用下桩基础的动力变化规律。

综上,目前对一般场地和液化场地桩基础的受力和破坏方面的研究较多,针对桩-震陷土层耦合作用下大直径变截面桩基础动力响应特性问题鲜有研

究。鉴于此,本文依托厦门第二东通道翔安大桥实体工程,主要分析了不同类型地震波作用下震陷场地条件大直径变截面钢管混凝土复合单桩桩身加速度、桩顶水平位移、桩身弯矩及桩基损伤。

1 工程背景

厦门第二东通道翔安大桥的抗震设防烈度为Ⅷ度,主桥段采用大直径变截面钢管混凝土复合桩,桩径2.50/2.15 m、桩长45 m,土层分布如图1所示,淤泥层天然孔隙比大于1.0,为软土层。在地震作用下,软土强度将迅速降低,极易发生触变沉陷,从而对桩基础产生不良影响^[41],因此需开展淤泥质土震陷条件下大直径变截面钢管混凝土复合桩动力响应研究。

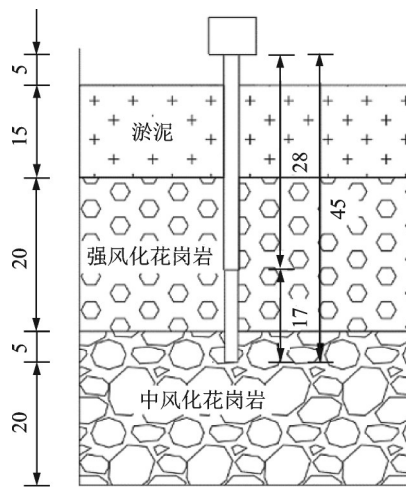


图1 土层分布(单位:m)

Fig. 1 Soil layer distribution(Unit:m)

2 振动台模型试验

2.1 试验设备

依托中国地震局工程力学研究所的三向六自由度5 m×5 m地震模拟振动台模型,其具体技术参数如表1所示。

模型箱尺寸为3.05 m×1.70 m×1.80 m(长×宽×高),如图2所示。模型箱内壁填充2 cm的泡沫板,从而减轻边界效应,降低试验过程中地震波反射的影响,防止振动过程中土体溢出。

2.2 相似比设计

试验采用人工质量模型,选用 $C_l=1/50$ 的几何相似关系,重力加速度相似比 $C_g=1$,按照土工相似原理,通过量纲分析法计算得到弹性模量相似比

表1 振动台技术参数

Tab. 1 Technical parameters of the shaker

性能	参数
台面尺寸	5000 mm×5000 mm
振动模式	正弦、随机(地震动)
频率范围	0.5~50 Hz
最大模型载重	30 t
最大加速度幅值	满载: X, Y向 1.0g; Z向 0.7g
最大速度幅值	X, Y向: 50 cm/s; Z向: 40 cm/s
最大位移幅值	X, Y向: ±80 mm; Z向: ±50 mm

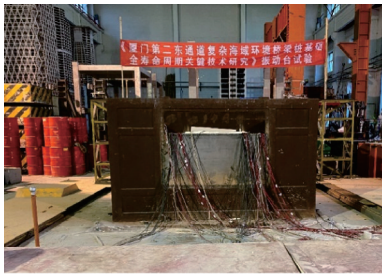


图2 模型箱示意图

Fig. 2 Schematic of the model box

$C_E=1/3.5$ 。综合考虑在单桩的桩顶配置 100 kg 的人工质量,各物理量相似常数如表 2 所示,其中, L 、 T 、 F 分别为长度、时间和力三个基本量纲。

表2 试验物理量相似常数

Tab. 2 Similarity constant of test physical quantity

物理量	量纲	符号	相似常数
加速度 a	LT^{-2}	1	1
重力加速度 g	LT^{-2}	1	1
速度 v	LT^{-1}	$C_l^{\frac{1}{2}}$	0.14
人工质量 m_a	$FL^{-1}T^2$	$C_E C_l^2 m_p - m_m$	—
线尺寸 l	L	C_l	0.02
线位移 δ	L	C_l	0.02

2.3 模型桩、土制作及测试元件布设

2.3.1 模型桩设计

桩身及承台采用微粒混凝土,桩身配筋率为 2.4%,主筋材料选取 4 根直径 4 mm 的镀锌铁丝,箍筋选取 1 根直径 2.8 mm 的镀锌铁丝,并用铁皮模拟钢管包裹在桩基础表面。模型桩长 90 cm,桩径 5.0/4.3 cm,变截面位置在桩顶以下 56 cm 处。为消除输入地震波的叠加效应,试验制作四根模型桩,并分别输入四种地震波,以此控制试验变量。模型桩的制作过程如图 3 所示。

2.3.2 模型土设计

基于翔安大桥地质勘查资料,中风化花岗岩抗压强度为 68 MPa,试验以土体抗压强度作为主要控



图3 模型桩的制作

Fig. 3 Manufacture of model piles

制指标,采用微粒混凝土模拟中风化花岗岩,利用万能试验机对其进行抗压强度测试,其抗压强度为 19 MPa,结果符合相似比关系,如图 4 所示。在中风化花岗岩浇筑时在桩基础相应位置设置深度为 5 cm 的预留孔,以便模型桩精准就位,如图 5 所示。采用液限仪测得模型土液限,土体物理力学参数如

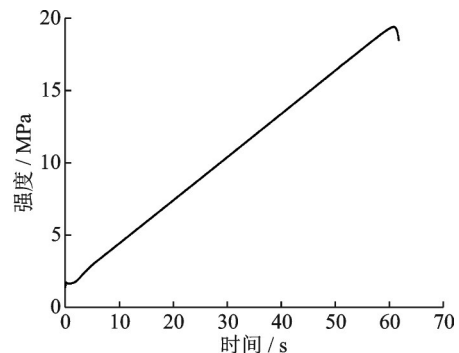


图4 抗压强度测试值

Fig. 4 Compressive strength test



图 5 预留孔

Fig. 5 Reserved holes

表 3 所示,根据《岩土工程勘察规范》^[42],天然孔隙比 ≥ 1.0 ,且其天然含水量超过液限的细粒土称为软土。采用筛分法测试淤泥的粒径组成,筛分过程如图 6 所示,累计曲线如图 7 所示。

表 3 土体物理力学参数

Tab. 3 Physical and mechanical parameters of soil mass

土类	天然含水量 $w/\%$	液限 $W_L/\%$	密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	黏聚力 / kPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	天然孔隙比
淤泥	原型	44.8	40.5	1.82	18.3	12
	模型	45.6	41.3	1.77	5	10
强风化花岗岩	原型	11.9	—	2.63	79.6	32
	模型	11.2	—	2.56	22.5	35



图 6 模型土筛分

Fig. 6 Model soil screening

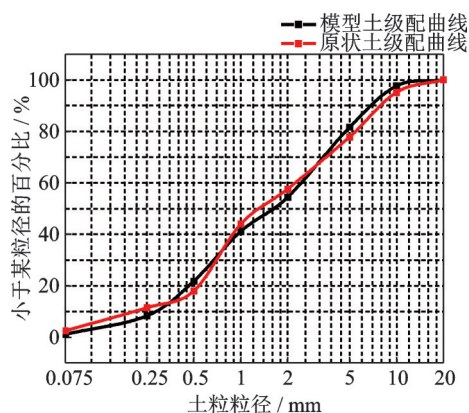


图 7 土的累积曲线

Fig. 7 Cumulative curve of soil

2.3.3 测试传感器布设

本试验采用位移传感器测量桩顶水平位移,采用加速度传感器测量桩顶、变截面及桩端加速度,采用应变片测量桩身应变,计算得出弯矩,如图 8 所示。每个应变片均设置补偿片,以此降低温度等其他的外在因素对试验结果和分析造成的干扰,模型桩装箱如图 9 所示。

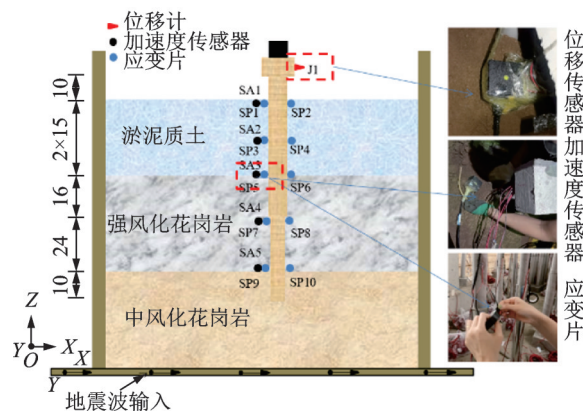


图 8 模型桩与测试原件布设(单位:cm)

Fig. 8 Layout of model piles and test elements(Unit:cm)

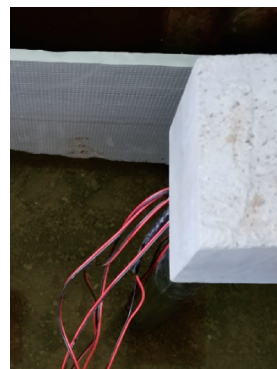


图 9 模型桩装箱

Fig. 9 Model pile packing

2.4 试验工况

测试四种不同类型地震波作用下,震陷场地大直径变截面钢管混凝土单桩的动力响应。根据厦门第二东通道翔安大桥地质勘查报告,拟建区抗震设防烈度为Ⅶ度,设计地震加速度峰值为 $0.15g$ 。输入的地震波为 $0.15g$ 地震动强度下的 5010 波、1004 波、Kobe 波和 El-Centro 波,其中 5010 波、1004 波分别为 50 年超越概率 10%、100 年超越概率 2% 的地震波。Kobe 波是日本阪神地震(M7.2)震中附近记录的地震波,El-Centro 波是典型的Ⅶ度地震烈度的地震波。输入振动台水平 X, Y 双向地震波,加速度幅值则按照水平 X 向:水平 Y 向=1:0.85 进行调整。X 方向为主输入方向,如图 10 所示,傅里叶谱如图 11 所示。试验工况如表 4 所示。

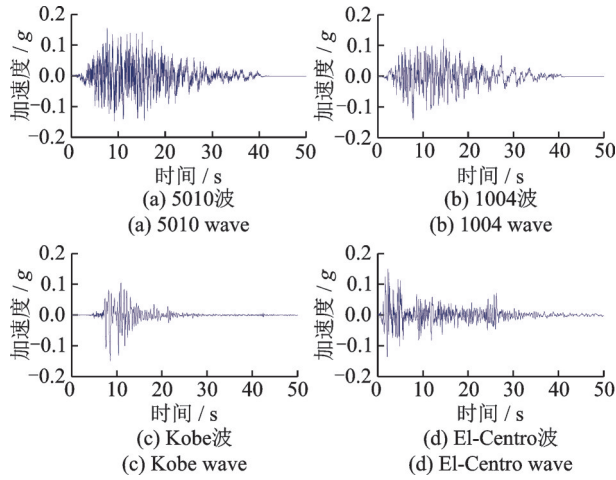


图10 地震波类型

Fig. 10 Seismic wave type

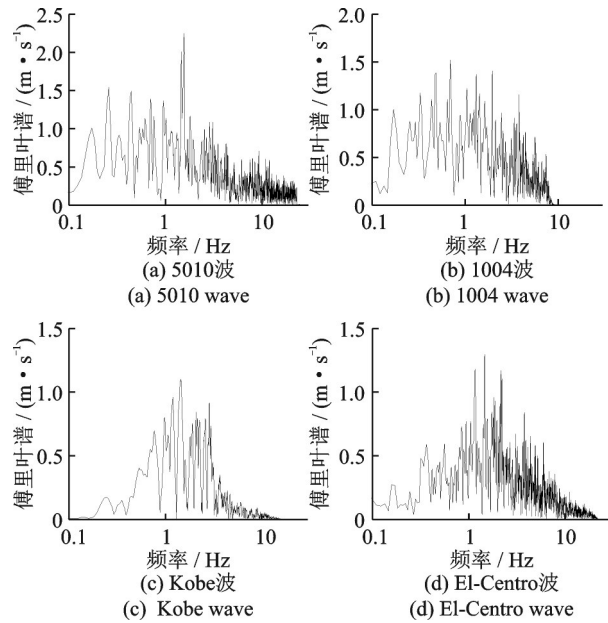


图11 傅里叶谱

Fig. 11 Fourier spectrum

表4 试验工况

Tab. 4 Test conditions

波形施加次序	地震波类型	地震波强度/g
1	白噪声波	0.05
2	5010波	0.15
3	白噪声波	0.05
4	1004波	0.15
5	白噪声波	0.05
6	0.15	0.15
7	白噪声波	0.05
8	0.15	0.15
9	白噪声波	0.05

3 试验结果分析

3.1 加速度时程响应

四种不同类型地震波作用下,大直径变截面钢

管混凝土复合单桩的桩身加速度变化如图12所示。

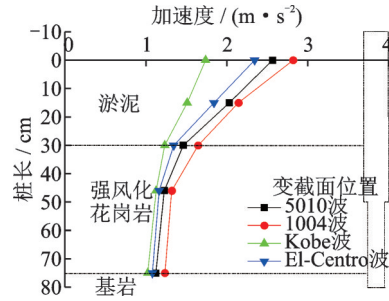


图12 桩身加速度变化规律

Fig. 12 Variation law of pile shaft acceleration

由图12可知,不同类型地震波作用下,大直径变截面钢管混凝土复合单桩均沿桩端至桩顶逐渐增大,其中在强风化花岗岩层中增长较慢,淤泥土层中增长显著,桩顶处加速度达到最大。这是由于地震动引起的周期荷载作用下,淤泥土体模量、有效应力、抗剪强度均不断减小,即表现出“软化”现象,桩周土体对桩基础的约束减小,导致桩身加速度放大作用显著。桩身变截面位于强风化花岗岩中,由变截面位置至土层分界面处,加速度显著增大,其原因为桩身变截面以上桩径较大,具有“扩径效应”,桩-土整体刚度增强,传递地震动的能力增加,导致桩身加速度放大效应明显。

大直径变截面钢管混凝土复合单桩桩顶加速度最大值以及桩顶加速度的放大系数如表5所示。其中,其加速度放大系数 α 定义为:

$$\alpha = \frac{\alpha_{\max}}{\alpha'_{\max}} \quad (1)$$

式中, α_{\max} 为桩身加速度的最大值; α'_{\max} 为输入的地震动加速度的峰值。

由表5可知,大直径变截面钢管混凝土复合单桩桩顶加速度放大系数差异明显,在Kobe波作用下最小,在1004波作用下最大。这是因为不同类型地震波的频率、周期、峰值等因素存在明显差异,且淤泥对不同的地震波的放大效应、滤波效应等敏感响应程度也不同。

表5 桩顶加速度最大值及放大系数

Tab. 5 Maximum pile top acceleration and amplification factor

地震波类型	桩顶加速度最大值/(m·s ⁻²)	桩顶加速度放大系数
5010波	2.57	1.71
1004波	2.82	1.88
Kobe波	1.74	1.16
El-Centro波	2.43	1.56

在四种不同类型地震波作用下,大直径变截面钢管混凝土复合单桩的桩身加速度变化如图 13 所示。

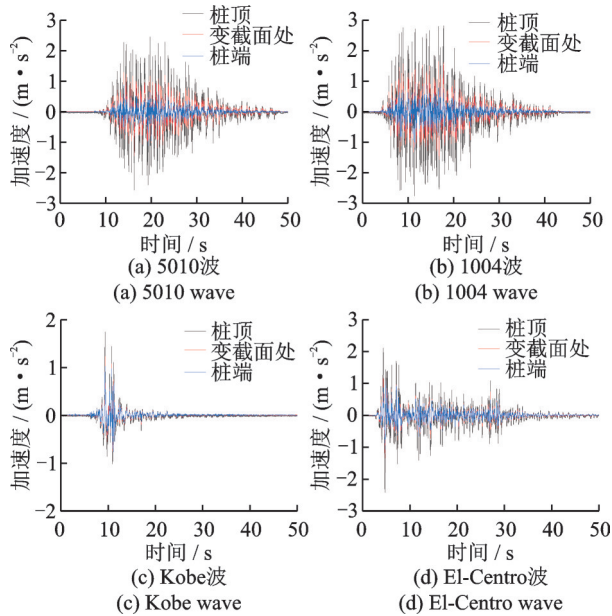


图 13 加速度时程响应

Fig. 13 Acceleration time course response

由图 13 可知,在不同类型地震波作用下,大直径变截面钢管混凝土复合单桩桩顶、变截面处、桩端加速度时程响应变化规律均随着输入地震波类型变化而变化,但均与输入的地震波形状大致相同,其中在 5010 波作用下加速度时程持时较长, Kobe 波作用下加速度时程持时较短,这是由于地震波的频谱特性不同而产生差异。桩顶、变截面处加速度时程响应曲线较为“稀疏”,频率与地震波的分布规律存在明显差异,其原因为淤泥在地震作用下会发生震陷,从而起到滤波作用;桩端加速度时程响应曲线频率较为“密集”,频率较高,与输入地震波较接近,说明桩端加速度时程响应曲线含较多的高频成分,中风化花岗岩的滤波效应较淤泥质土弱。

3.2 桩顶水平位移时程响应

在四种不同类型地震波作用下,大直径变截面钢管混凝土复合单桩桩顶水平位移时程响应变化规律如图 14 所示,最大值变化如图 15 所示。

由图 14 可知,不同地震波作用下,大直径变截面钢管混凝土复合单桩桩顶水平位移时程变化规律以及永久水平位移值均存在差异。其中在 5010 波、1004 波、Kobe 波及 El-Centro 波作用下,桩顶的永久水平位移值分别为 0.086、0.145、0.050 和 0.084 mm。说明桩顶永久水平位移值随着不同类型的地震波而发生变化。在 5010 波、1004 波、Kobe 波及 El-Centro 波的作用下,其水平位移分别在 17.02、14.39、8.69 和 4.0 s 时达到最大,且最大值分别为 0.62、0.75、

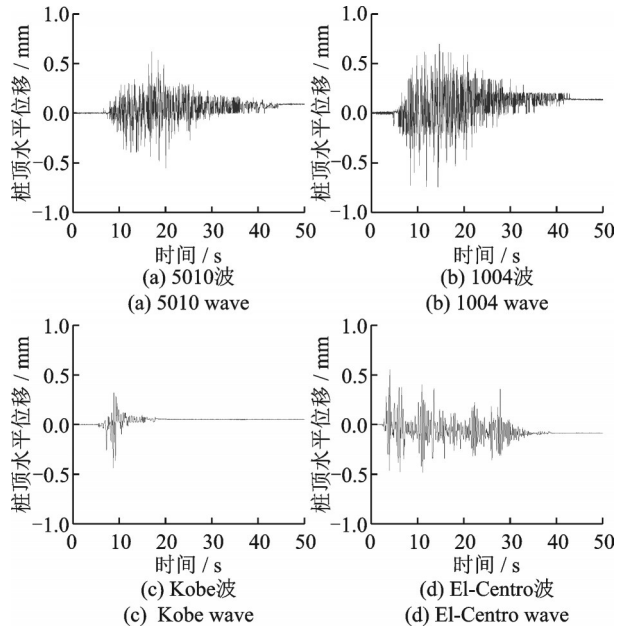


图 14 桩顶水平位移时程

Fig. 14 Time history of horizontal displacement of pile top

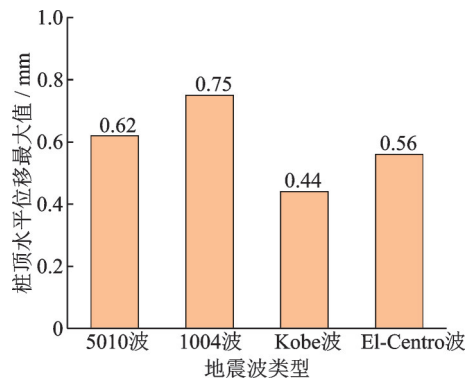


图 15 桩顶水平位移最大值

Fig. 15 Maximum horizontal displacement of pile top

0.44 和 0.56 mm。其原因为在地震波加载的初期,桩周土逐渐密实,对大直径变截面钢管混凝土复合桩的约束作用明显,而在继续加载的过程中,桩周土发生较大的剪切变形,使得其强度及桩侧土抗力均减小,对桩基的约束作用减弱,从而使桩身产生水平位移,进一步引起较大的桩顶水平位移。

由图 15 可知,在不同类型地震波作用下,大直径变截面钢管混凝土复合单桩桩顶水平位移最大值差异显著,说明在震陷过程中,由于地震波的频谱的不同,导致单桩产生的水平位移存在差异。其中在 1004 波作用下桩顶水平位移最大,原因在于 1004 波频谱特性与桩基固有频率更为接近,共振作用显著。

3.3 桩身弯矩时程响应

在四种不同类型地震波作用下,大直径变截面钢管混凝土复合单桩的桩身弯矩的变化如图 16 所示,单桩桩身弯矩最大值如图 17 所示。根据规范公式

计算得桩基础的设计抗弯承载力为 $85.12 \text{ kN}\cdot\text{m}$ ^[43], 进而评价大直径变截面钢管混凝土复合单桩在不同类型的地震波作用下的抗弯承载能力。

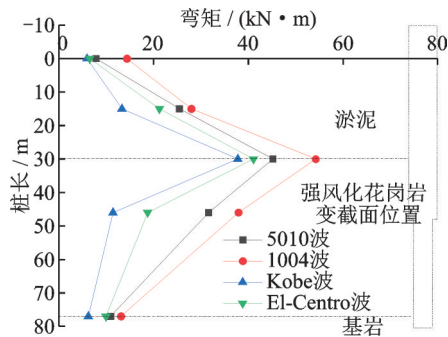


图 16 桩身弯矩变化规律

Fig. 16 Variation law of pile bending moment

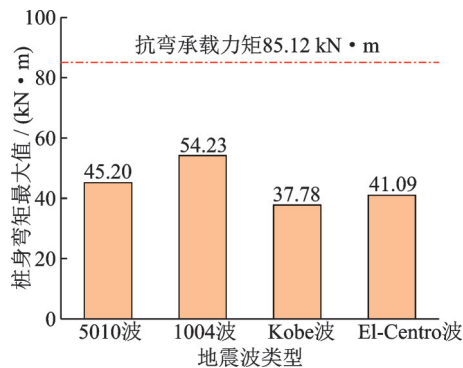


图 17 桩身弯矩最大值

Fig. 17 Maximum bending moment of pile shaft

由图 16 和 17 可知, 不同类型地震波作用下, 大直径变截面钢管混凝土复合单桩桩身弯矩沿桩长方向变化规律基本相同, 均从桩顶至桩端呈现先增大后减小的趋势。桩基础桩身弯矩最大值均出现在软硬土层分界面, 即震陷土层与非震陷土层分界面处, 这是由于在地震作用下淤泥震陷特性引起桩-土产生相对运动, 桩基础产生较强的动力响应, 导致桩身弯矩显著增大。桩身弯矩在 1004 波作用下响应最为明显, 最大值较大, 在 Kobe 波作用下最大值较小, 同样说明地震波频谱特征对桩身弯矩有所影响。在 5010 波、1004 波、Kobe 波及 El-Centro 波作用下, 桩基础分别有 46.90%、36.29%、55.62% 和 51.73% 的抗弯承载能力富余。说明在 0.15g 地震波作用下, 翔安大桥单桩基础满足抗震设防烈度为Ⅶ度的抗震要求。

在四种不同类型地震波作用下, 大直径变截面钢管混凝土复合单桩桩身弯矩时程如图 18 所示。

由图 18 可知, 大直径变截面钢管混凝土复合单桩桩身弯矩在 0~30 s 范围内弯矩振幅较大, 从 30 s 以后弯矩随之减小, 并最终趋于零。桩身弯矩最大值出现的时刻随地震波类型的不同而变化, 其中在 El-Centro 波作用下出现的时刻最早, 在 Kobe 波作

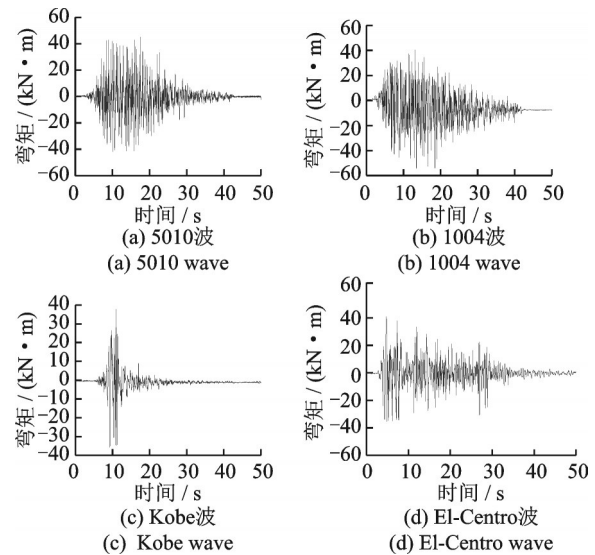


图 18 桩身弯矩时程

Fig. 18 Time history of pile bending moment

用下出现的时刻最晚, 这是由于不同地震波的频谱特性不同导致的。

3.4 桩基损伤

通过 Seisnosignal 软件对白噪声工况下埋置桩端加速度传感器 (SA5 测点) 采集的数据进行滤波处理, 排除干扰因素后进行傅里叶变换, 如图 19 所示, 桩基础基频变化规律如图 20 所示。

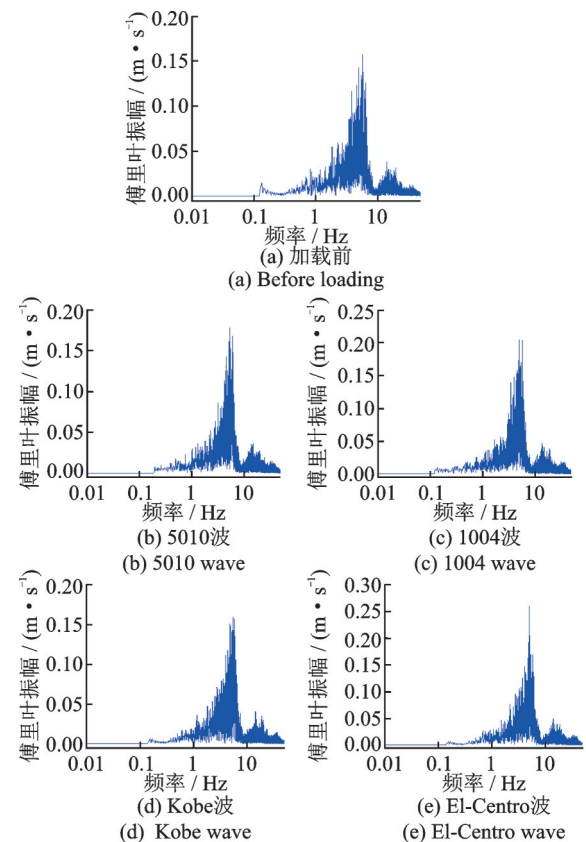


图 19 桩基础傅里叶谱

Fig. 19 Fourier spectrum of pile foundation

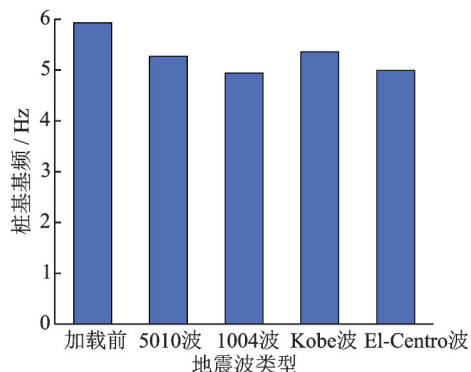


图20 桩基础基频变化规律

Fig. 20 Variation law of fundamental frequency of pile foundation

由图19和20可知,大直径变截面钢管混凝土复合单桩加载前基频为5.93 Hz,加载5010波、1004波、Kobe波和El-Centro波后,桩基础基频分别为5.27、4.94、5.36和4.99 Hz,与加载前相比均存在小幅度的降低,但总体未出现明显变化。说明翔安大桥大直径变截面钢管混凝土复合单桩的刚度及结构完整性在0.15g地震波作用下未发生明显变化,桩基没有产生较为明显的损伤破坏。

4 结论与建议

综合厦门第二东通道翔安大桥工程实际情况及振动台试验分析结果,得出以下结论:

(1)在不同类型地震波作用下,大直径变截面钢管混凝土复合单桩桩身加速度沿桩端至桩顶逐渐增大,在强风化花岗岩层中增长较慢,淤泥土层中增长较快。桩身变截面位于强风化花岗岩,变截面至土层分界面处,加速度增长显著。输入不同类型地震波时,桩顶、变截面处加速度时程响应曲线较“稀疏”,频率与地震波的分布规律存在明显差异,桩端加速度时程响应曲线较“密集”,频率较高。桩顶加速度最大值及放大系数均在Kobe波作用下最小,在1004波作用下最大。

(2)在不同类型地震波作用下,大直径变截面钢管混凝土复合单桩桩顶水平位移时程响应及永久水平位移值均存在差异。在1004波作用下,桩顶水平位移最大值最大,其次为5010波、El-Centro波和Kobe波。

(3)在不同类型地震波作用下,大直径变截面钢管混凝土复合单桩桩身弯矩均从桩顶至桩端呈现先增大后减小的趋势,且均未超过桩基础设计抗弯承载能力,符合厦门第二东通道翔安大桥抗震设防烈度Ⅶ度的要求。1004波作用下桩身弯矩动力响应最为明显,其弯矩峰值最大。

(4)在不同类型地震波作用下,大直径变截面钢管混凝土复合单桩的动力响应不同,这是由于地震

波的峰值、频率、周期等频谱特性存在明显差异。

(5)在不同类型地震波作用下,大直径变截面钢管混凝土复合单桩基础基频未发生明显降低,表明桩基础未发生较为明显的损伤破坏,符合厦门第二东通道翔安大桥安全运营功能要求。

(6)地震作用下进行大直径变截面钢管混凝土复合单桩抗弯承载能力设计时,着重考虑软硬土层分界面处的抗弯能力设计。

参考文献:

- [1] ZHANG C, FENG Z J, GUAN Y H, et al. Study on liquefaction resistance of pile group by shaking table test [J]. *Advances in Civil Engineering*, 2022, 2022(1): 5074513.
- [2] FENG Z J, HUO J W, HU H B, et al. Research on corrosion damage and bearing characteristics of bridge pile foundation concrete under a dry-wet-freeze-thaw cycle[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2021, 2021: 88843961.
- [3] DONG Y X, FENG Z J, HU H B, et al. The horizontal bearing capacity of composite concrete-filled steel tube piles[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2020, 2020(1): 1-16.
- [4] FENG Z J, HU H B, DONG Y X, et al. Effect of steel casing on vertical bearing characteristics of steel tube-reinforced concrete piles in loess area[J]. *Applied Sciences*, 2019,9(14): 1-17.
- [5] DONG Y X, FENG Z J, HE J B, et al. Seismic response of a bridge pile foundation during a shaking table test[J]. *Shock and Vibration*, 2019, 2019: 9726013.
- [6] CHEN H Y, FENG Z J, LI T, et al. Study on the vertical bearing performance of pile across cave and sensitivity of three parameters[J]. *Scientific Report*, 2021, 11: 17342.
- [7] 冯忠居, 孟莹莹, 张聪, 等. 强震作用下液化场地群桩动力响应及 p - y 曲线[J]. *岩土力学*, 2022, 43(5): 1289-1298. FENG Zhongju, MENG Yingying, ZHANG Cong, et al. Dynamic response and p - y curve of pile group in liquefied site under strong seismic action[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2022, 43(5): 1289-1298.
- [8] 何静斌, 冯忠居, 董芸秀, 等. 强震区桩-土-断层耦合作用下桩基动力响应[J]. *岩土力学*, 2020, 41(7): 2389-2400. HE Jingbin, FENG Zhongju, DONG Yunxiu, et al. Dynamic response of pile foundation under coupling of pile-soil-fault in strong seismic zone[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(7): 2389-2400.
- [9] DUMAS F, LEE K L. Cyclic movements of offshore structures on clay[J]. *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 1981, 18(2): 31.
- [10] LEE L K. Seismic permanent deformations in earth dams: NSF-RA-E-75-220[R]. University of Califor-

- nia, Los Angeles, California, 1974.
- [11] 郁寿松, 石兆吉. 土壤震陷试验研究[J]. 岩土工程学报, 1989, 11(4): 35-44.
YU Shousong, SHI Zhaoji. Experimental investigation on soil subsidence[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1989, 11(4): 35-44.
- [12] 石兆吉, 郁寿松, 翁鹿年. 塘沽新港地区震陷计算分析[J]. 土木工程学报, 1988, 21(4): 24-34.
SHI Zhaoji, YU Shousong, WENG Lunian. Seismic settlement evaluation for Tanggu Newport area[J]. Chinese Journal of Civil Engineering, 1988, 21(4): 26-36.
- [13] 王建华. 软土地基震陷的弹塑性分析[J]. 天津大学学报, 1996, 21(3): 336-341.
WANG Jianhua. Elastoplastic analysis on seismic settlement of soft clay foundation[J]. Journal of Tianjin University, 1996, 21(3): 336-341.
- [14] 王建华, 要明伦, 贾有权. 软土地基震陷分析[J]. 天津大学学报, 1993(4): 67-72.
WANG Jianhua, YAO Minglun, Jia Youquan. Analysis of earthquake settlement of foundation on soft clay [J]. Journal of Tianjin University, 1993(4): 67-72.
- [15] 李丹, 简迪, 吴卓尔, 等. 三级阶梯型变截面嵌岩桩的承载特性研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(增刊2): 1-8.
LI Dan, JIAN Di, WU Zhuoer, et al. Study on bearing characteristics of three-step variable section rock embedded piles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41 (Sup2): 1-8.
- [16] 胡文韬, 刘豆, 耿大新, 等. 水平受荷阶梯形变截面桩的内力及变形分析[J]. 浙江大学学报(工学版), 2020, 54(4): 739-747.
HU Wentao, LIU Dou, GENG Daxin, et al. Internal force and deformation of step-tapered pile under lateral loads[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2020, 54(4): 739-747.
- [17] 崔允亮, 王新, 周联英, 等. 基于光纤监测的大直径变截面钢管复合桩承载性状[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2020, 51(6): 1627-1636.
CUI Yunliang, WANG Xin, ZHOU Lianying, et al. Bearing behavior of large-diameter variable cross-section steel composite pile based on optical fiber monitoring[J]. Journal of Central South University (Natural Science Edition), 2020, 51(6): 1627-1636.
- [18] 周杨, 肖世国, 徐骏, 等. 变截面螺纹桩竖向承载特性试验研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(3): 747-754.
ZHOU Yang, XIAO Shiguo, XU Jun, et al. Model test on vertical bearing capacity of variable Cross-section thread piles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(3): 747-754.
- [19] 方焘, 刘新荣, 耿大新, 等. 大直径变径桩竖向承载特性模型试验研究(I)[J]. 岩土力学, 2012, 33(10): 2947-2952.
FANG Tao, LIU Xinrong, GENG Daxin, et al. Model testing study on vertical bearing behaviors for large diameter pile with variable cross-section(I)[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(10): 2947-2952.
- [20] GOH Siang Huat, ZHANG Lei. Estimation of peak acceleration and bending moment for pile-raft systems embedded in soft clay subjected to far-field seismic excitation[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2017, 143(11): 04017082.
- [21] GARALA T K, MADABHUSHI G S P. Seismic behaviour of soft clay and its influence on the response of friction pile foundations[J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2019, 17(4): 1919-1939.
- [22] KANEDA S, HAYASHI K, HACHIMORI W, et al. Failure behavior of concrete pile and super-structure dynamic response as a result of soil liquefaction during earthquake[J]. AIP Conference Proceedings, 2017, 1892(1): 020016.
- [23] YAN K M, HE J S, CHENG Q G, et al. A centrifugal experimental investigation on the seismic response of group-pile foundation in a slope with an inclined weak intercalated layer[J]. Soil Dynamics Earthquake Engineering, 2020, 130: 105961.
- [24] KUMAR M, MISHRA S S. Study of seismic response characteristics of building frame models using shake table test and considering soil-structure interaction[J]. Asian Journal of Civil Engineering, 2019, 20(3): 409-419.
- [25] 田兆阳, 李平, 朱胜, 等. 强震作用下软土地桩基负摩阻力振动台试验研究[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(3): 550-559.
TIAN Zhaoyang, LI Ping, ZHU Sheng, et al. Shaking table tests on negative friction of piles in soft soils under strong earthquake motion[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(3): 550-559.
- [26] 田兆阳, 李平, 张宇东, 等. 软土地基-浅基础体系地震反应数值分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2021, 41(6): 1228-1237.
TIAN Zhaoyang, LI Ping, ZHANG Yudong, et al. Numerical analysis on seismic response of soft soil-shallow foundation system[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2021, 41(6): 1228-1237.
- [27] 沈婷, 李国英, 章为民. 超深桩基础的有效应力地震反应有限元分析[J]. 岩土力学, 2004, 25(7): 1045-1049.
SHEN Ting, LI Guoying, ZHANG Weimin. Effective stress finite element analysis for seismic response of deep pile foundation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(7): 1045-1049.
- [28] 张磊, 许徐晗, 陈成, 等. 地震作用下软土中桩承桥墩系统响应特性分析[J]. 振动工程学报, 2022, 35(6): 1520-1540.
ZHANG Lei, XU Xuhan, CHEN Cheng, et al. Seismic response characteristics of clay-pile-pier systems[J]. Journal of Vibration Engineering, 2022, 35(6): 1530-1540.
- [29] 程学磊, 崔春义, 孙宗光. 饱和软土自由场地地震反应特性振动台试验[J]. 地震工程学报, 2019, 41(1): 108-116.
CHENG Xuelei, CUI Chunyi, SUN Zongguang. Shaking table tests on the seismic response characteristics of a free field in saturated soft soil[J]. China Earthquake

- Engineering Journal, 2019, 41(1): 108-116.
- [30] 冯忠居, 陈慧芸, 袁枫斌, 等. 桩-土断层耦合作用下桥梁桩基竖向承载特性[J]. 交通运输工程学报, 2019, 19(2): 36-48.
FENG Zhongju, CHEN Huiyun, YUAN Fengbin, et al. Vertical bearing characteristics of bridge pile foundation under pile-soil-fault coupling action[J]. Journal of Transportation Engineering, 2019, 19(2): 36-48.
- [31] 冯忠居, 董芸秀, 何静斌, 等. 强震作用下饱和粉细砂液化振动台试验[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2019, 51(9): 186-192.
FENG Zhongju, DONG Yunxiu, HE Jingbin, et al. Shaking table test of saturated fine sand liquefaction under strong seismic[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2019, 51(9): 186-192.
- [32] 冯忠居, 王溪清, 李孝雄, 等. 强震作用下的砂土液化对桩基力学特性影响[J]. 交通运输工程学报, 2019, 19(1): 71-84.
FENG Zhongju, WANG Xiqing, LI Xiaoxiong, et al. Effect of sand liquefaction on mechanical properties of pile foundation under strong seismic[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2019, 19(1): 71-84.
- [33] 冯忠居, 王富春, 张其浪, 等. 钢管混凝土复合桩横向承载特性离心模型试验研究[J]. 土木工程学报, 2018, 51(1): 114-123.
FENG Zhongju, WANG Fuchun, ZHANG Qilang, et al. Centrifugal model test of horizontal bearing characteristics of steel pipe concrete composite pile[J]. China Civil Engineering Journal, 2018, 51(1): 114-123.
- [34] 刘闯, 冯忠居, 张福强, 等. 地震作用下特大型桥梁嵌岩桩基础动力响应[J]. 交通运输工程学报, 2018, 18(4): 53-62.
LIU Chuang, FENG Zhongju, ZHANG Fuqiang, et al. Dynamic response of rock-socketed pile foundation for extra large bridges under earth quake action[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2018, 18(4): 53-62.
- [35] 许成顺, 豆鹏飞, 杜修力, 等. 液化自由场地震响应大型振动台模型试验分析[J]. 岩土力学, 2019, 40(10): 3767-3777.
XU Chengshun, DOU Pengfei, DU Xiuli, et al. Experimental Large-scale shaking table model test of liquefiable free field[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(10): 3767-3777.
- [36] 张健, 李雨润, 闫志晓, 等. 基于频谱分析的饱和砂土地直斜群桩承台——土体耦合作用下桩身弯矩分布规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(4): 829-844.
ZHANG Jian, LI Yurun, YAN Zhixiao, et al. Study on the distribution law of the bending moment of vertical and batter pile in saturated sand under cap and soil coupling based on frequency analysis[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(4): 829-844.
- [37] 李雨润, 闫志晓, 张健, 等. 饱和砂土中直群桩动力响应离心振动台试验与简化数值模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(6): 1252-1264.
LI Yurun, YAN Zhixiao, ZHANG Jian, et al. Centrifugal shaking table test and numerical simulation of dynamic response of straight pile in saturated sand[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(6): 1252-1264.
- [38] 冯忠居, 张聪, 何静斌, 等. 强震作用下嵌岩单桩时程响应振动台试验[J]. 岩土力学, 2021, 42(12): 3227-3237.
FENG Zhongju, ZHANG Cong, HE Jingbin, et al. Shaking table test of time-course response of rock-socketed single pile under strong earthquake[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(12): 3227-3237.
- [39] 冯忠居, 张聪, 何静斌, 等. 强震作用下群桩基础抗液化性能的振动台试验[J]. 交通运输工程学报, 2021, 21(4): 72-83.
FENG Zhongju, ZHANG Cong, HE Jingbin, et al. Shaking table test of liquefaction resistance of group pile under strong earthquake[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2021, 21(4): 72-83.
- [40] 张聪, 冯忠居, 孟莹莹, 等. 单桩与群桩基础动力时程响应差异振动台试验[J]. 岩土力学, 2022, 43(5): 1326-1334.
ZHANG Cong, FENG Zhongju, MENG Yingying, et al. Shaking table test on the difference of dynamic time-course response between single pile and pile group foundation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(5): 1326-1334.
- [41] 陈正汉, 李刚, 王权民, 等. 厦门典型地基土的地震反应分析与评价[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(21): 3864-3875.
CHEN Zhenghan, LI Gang, WANG Quanmin, et al. Analysis and evaluation of seismic reaction of typical foundation soils in Xiamen[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(21): 3864-3875.
- [42] 中华人民共和国建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 岩土工程勘察规范: GB 50021—2001[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
Ministry of Construction of People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Code for investigation of geotechnical engineering: GB 50021—2001[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009.
- [43] 中华人民共和国交通运输部. 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范: JTG 3362—2018[S]. 北京: 人民交通出版社, 2018.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Specifications for Design of Highway Reinforced Concrete and Prestressed Concrete Bridges and Culverts: JTG 3362—2018[S]. Beijing: China Communication Press, 2018.

第一作者: 冯忠居(1965—),男,博士,教授。

E-mail: ysf@gl.chd.edu.cn

通信作者: 王逸然(1997—),女,硕士。

E-mail: 125104692@qq.com