

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2023.01.009

# 地震作用下大直径嵌岩单桩动力响应数值分析

贺瑞<sup>1</sup>, 朱元张<sup>1</sup>, 张继生<sup>1</sup>, 吉吉<sup>1</sup>, 国振<sup>2</sup>

(1. 河海大学港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 浙江大学建筑工程学院, 浙江 杭州 310058)

**摘要:**以大直径嵌岩单桩为研究对象,对地震荷载作用时桩、土、岩的变形规律及桩基刚度进行分析,在有限元-无限元耦合数值模拟中引入土体非线性黏弹性本构模型与岩体损伤本构模型来描述桩周土、岩介质刚度随应变衰减的特性。数值模拟结果表明,大直径嵌岩单桩位移、加速度等动力响应,土体非线性滞回特性以及岩石损伤程度等显著受到桩基嵌岩深度、岩石风化程度和地震烈度等因素的影响,在设计时应深入分析。

**关键词:**大直径;嵌岩单桩;黏弹性本构模型;损伤模型;地震荷载;桩土动力相互作用

中图分类号: TU476

文献标志码: A

文章编号: 1000-1980(2023)01-0066-11

## Numerical analysis of dynamic response of large-diameter rock-socketed monopiles under seismic loads

HE Rui<sup>1</sup>, ZHU Yuanzhang<sup>1</sup>, ZHANG Jisheng<sup>1</sup>, JI Ji<sup>1</sup>, GUO Zhen<sup>2</sup>

(1. College of Harbour, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

**Abstract:** Large-diameter monopile is taken as the research object to analyze the deformation behavior of pile, soil and rock, and the stiffness of pile foundation under seismic loads. A nonlinear viscoelastic constitutive model of soil and a damage model of rock mass are introduced to describe the stiffness degradation characteristics of soil and rock media around piles in the finite element-infinite element coupled numerical simulation. The numerical simulation results show that the dynamic responses of large-diameter rock-socketed pile, such as displacement and acceleration, the nonlinear hysteresis characteristics of soil and the damage degree of rock are mainly affected by the depth of rock-socketed pile, the degree of rock weathering and seismic intensity, and should be deeply analyzed in the design.

**Key words:** large-diameter; rock-socketed monopile; nonlinear viscoelastic constitutive model; damage model; seismic load; dynamic interaction between pile and soil

随着风电产业的飞速发展,我国在福建、广东地区建造了大量的海上风电场。福建、广东地区近海海域多为岩基海域,具有覆盖层厚度、基岩埋深及风化程度变化大等特点<sup>[1]</sup>;断裂构造十分发育,且近海存在地震构造带<sup>[2]</sup>,风机服役周期内可能遭受地震的影响。大直径单桩由于制作工艺成熟,具有较好的抗疲劳性,是海上风电场嵌岩区域桩型较好的选择<sup>[3-4]</sup>,而大直径嵌岩单桩在地震作用下的动力响应目前研究较少。

桩-土-结构的动力相互作用问题近年来研究较多。上部动力荷载作用下桩-土动力分析中多采用线弹性介质假设<sup>[5-8]</sup>。Naggar等<sup>[9]</sup>在桩-土动力分析中考虑土体非线性、桩-土界面接触的不连续性以及地基土受动荷载时的滞回效应等影响因素,并结合工程实例发现地基土非线性因素对桩-土动力相互作用体系的影响较大。非线性黏弹性模型是土与结构动力相互作用分析中广泛应用的模型之一,虽然不能反映土的变形累积及应力路径的影响,在大应变时计算误差较大且偏于不安全,但概念明确,参数简单<sup>[10]</sup>,参数可由相应土体的试验结果归纳得出,已广泛应用于土工结构的振动与抗震研究中。庄海洋<sup>[11]</sup>对南京及其邻近地区大量土体试验结果进行 Davidenkov 模型的参数拟合,该模型能较好地描述土体的动力变形特性;刘齐建<sup>[12]</sup>通

基金项目: 国家自然科学基金(51879097)

作者简介: 贺瑞(1987—),男,教授,博士,主要从事海洋工程桩-土动力相互作用研究。E-mail: herui@hhu.edu.cn

通信作者: 张继生(1979—),男,教授,博士,主要从事波浪-海床-结构物相互作用机理研究。E-mail: jszhang@hhu.edu.cn

引用本文: 贺瑞,朱元张,张继生,等.地震作用下大直径嵌岩单桩动力响应数值分析[J].河海大学学报(自然科学版),2023,51(1):66-76.

HE Rui, ZHU Yuanzhang, ZHANG Jisheng, et al. Numerical analysis of dynamic response of large-diameter rock-socketed monopiles under seismic loads[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2023, 51(1): 66-76.

过试验得到上海地区饱和软土动剪切模量与阻尼比随动剪应变变化的关系曲线,认为 Davidenkov 模型能较好地模拟土体的弱化规律;荣棉水等<sup>[13]</sup>对渤海海域软土开展动三轴试验,发现 Davidenkov 模型对试验结果的拟合比 Hardin-Drnevich 模型更适用于海域软土。

前人在研究单桩的地震响应时考虑了土质海床中地震波方向、地震烈度、荷载组合等的影响。He 等<sup>[14-15]</sup>采用严格的半解析法研究了水-桩-土耦合振动问题的求解方法,从机理上解释了海上风机大直径单桩在垂直入射地震波作用下的共振及反共振现象,以及大直径单桩在斜入射地震波作用下水平动力响应的放大现象。基于有限元数值模拟,Risi 等<sup>[16]</sup>重点研究了典型海上风机在不同类型地震下的结构性能评估,结果表明,单桩结构在极端地壳地震和界面地震中尤其脆弱;李亚洲等<sup>[17]</sup>以 Mohr-Coulomb 模型模拟土体,通过有限元模型研究,发现桩基入土深度增大会显著减小桩身位移,桩基壁厚存在同样的规律;Hnler 等<sup>[18]</sup>提出了一种考虑地面运动的海上风电机组地震响应仿真分析方法;高盟等<sup>[19]</sup>采用 ABAQUS 有限元程序建立了地震荷载作用下扩底桩-土-结构和普通等直径桩-土-结构动力相互作用体的三维有限元模型,分析大直径扩底桩与普通等直径桩地震反应的差异;Chen 等<sup>[20]</sup>建立了单桩-海水-海床耦合系统的三维数值模型,在频域上研究了单桩-海水-海床耦合系统的动力特性,讨论了海水动水压力、海床孔隙压力、单桩和海床加速度幅值的地震响应;Mo 等<sup>[21]</sup>分别对在地震作用下静止和额定风速正常运行的单桩基础风机进行时域模拟,研究了地面运动方向对单桩基础风机的地震动力响应影响;席仁强<sup>[22]</sup>等改进了 FAST 软件,以研究单桩式海上风机在风-波浪-地震共同作用下的动力行为,结果显示,在风-波浪-地震的共同作用下,风机支撑结构危险截面剪力和弯矩峰值超过极端风-波浪的作用效应。基于物理模型试验,Banerjee 等<sup>[23]</sup>对黏土中单桩进行离心机振动台试验,试验结果表明,桩土相互作用的程度取决于地震载荷的强度;Wilson 等<sup>[24]</sup>对不同密实度两层土中的单桩进行了离心试验,在强烈的地震运动中土体液化导致地基强度降低。

总之,目前对土质海床中单桩的地震响应研究较多,嵌岩桩的地震响应研究较少。由于岩体刚度远大于土体而接近于单桩,导致嵌岩单桩的动力特性可能与土质海床中的单桩有很大的差异。本文采用非线性黏弹性本构模型和损伤本构模型分别描述土体和岩体的非线性动应力-应变关系,分析在水平地震荷载作用下地震烈度、嵌岩深度、土岩弹性模量比等参数对桩-土-岩相互作用体系动力响应的影响。

## 1 土-岩结构非线性分析

### 1.1 材料本构关系选取

土体采用基于 Davidenkov 骨架曲线的非线性黏弹性本构模型<sup>[25]</sup>描述,岩体采用混凝土损伤塑性本构模型<sup>[26-27]</sup>(CDP 模型)描述。

#### 1.1.1 基于 Davidenkov 骨架曲线的非线性黏弹性本构模型

借助子程序的方法将基于 Davidenkov 骨架曲线的土体动力本构模型嵌入 Abaqus 软件中,拟合动力荷载作用下土的剪切模量比与剪应变幅值( $G/G_{\max} \sim \gamma$ )关系曲线,采用陈国兴等<sup>[25]</sup>提出的剪应变幅值上限值作为分界点,对 Davidenkov 骨架曲线用分段函数法进行修正。

Hardin 等<sup>[28]</sup>提出了计算动剪切模量比  $G/G_{\max}$  的表达式:

$$G/G_{\max} = 1 - H(\gamma) \quad (1)$$

Martin 等<sup>[29]</sup>采用 Davidenkov 模型来描述动剪切模量比与剪应变幅值的关系,将式(1) $H(\gamma)$  表达为

$$H(\gamma) = \left[ \frac{(\gamma/\gamma_0)^{2B}}{1 + (\gamma/\gamma_0)^{2B}} \right]^A \quad (2)$$

式中  $A$ 、 $B$ 、 $\gamma_0$  为与土性质相关的曲线形态拟合参数。

故 Davidenkov 模型描述的土体骨架曲线与加卸载条件下土体应力-应变关系为

$$\tau(\gamma) = G\gamma = G_{\max} \gamma [1 - H(\gamma)] \quad (3)$$

根据岩土材料屈服后先硬化、后软化的特性,认为各类土都存在某一剪应变上限值  $\gamma_{ult}$ 。当土体的剪应变幅值  $\gamma$  超过该上限值时,土体将处于破坏状态,此时土体内剪应力  $\tau$  将不再随剪应变幅值  $\gamma$  的增加而增加,甚至有减小的趋势。本文不考虑土的软化现象,将剪应变达到  $\gamma_{ult}$  后的土体剪应力  $\tau$  取为  $\tau_{ult}$ ,因此 Davidenkov 模型的表达式可以利用分段模型表达为

$$\tau(\gamma) = G_d \gamma = \begin{cases} G_{\max} \gamma [1 - H(\gamma)] & \gamma_c \leq \gamma_{\text{ult}} \\ G_{\max} \gamma_{\text{ult}} [1 - H(\gamma)] & \gamma_c > \gamma_{\text{ult}} \end{cases} \quad (4)$$

### 1.1.2 岩体损伤本构模型

岩体在中等加载应变速率( $10^{-4} \sim 10^{-2}$ )条件下的变形可分为初始受压密实阶段、线弹性阶段、屈服阶段、破坏后软化阶段<sup>[26]</sup>。CDP模型考虑了材料拉压损伤引起的强度退化,是分析循环加载和动态加载条件下结构力学响应的一种普适材料模型<sup>[26]</sup>,材料的屈服主要由拉伸等效塑性应变和压缩等效塑性应变控制。岩石和混凝土的损伤在机理上存在共性,因此采用CDP模型描述岩体受力屈服后软化的特性。在定义材料属性时,利用CDP模型定义界面输入控制岩体应力应变曲线的参数 $\sigma_1$ (抗压强度)、 $\bar{\varepsilon}_{\text{in}}$ (非弹性应变)与 $D_t$ (损伤因子)来定义岩体的变形特征。

## 1.2 有限元模型

鉴于三维有限元模型单元数量大、计算时间长,考虑岩土材料非线性以及桩土/桩岩接触问题会导致计算量过大。在研究土与结构物动力相互作用时,平面应变模型<sup>[30]</sup>以其简单实用的优点成为应用最广泛的一种模型,特别是在研究桩的振动理论方面。平面应变模型是Novak等<sup>[31-34]</sup>提出的,王奎华等<sup>[35]</sup>的研究表明简化平面应变模型基本可以满足工程应用的精度要求。

利用平面动力分析代替三维分析,将桩-土-岩动力相互作用响应简化为平面应变问题,以减少模型运算时长与运算量。分别建立弹性空间内的三维桩-土-岩地震作用三维有限元模型与简化平面应变模型,图1为弹性三维有限元模型示意图, $D$ 为单桩桩径, $L$ 为桩长, $h_0$ 为嵌岩深度, $Z$ 为竖直方向的深度。对比两者的计算结果,以检验简化平面应变模型计算结果的可靠性。取单桩桩径为7 m,桩长为35 m,嵌入岩层深度 $1D$ ;平面应变模型的几何尺寸、接触设置与三维模型保持一致,地基计算高度取80 m。

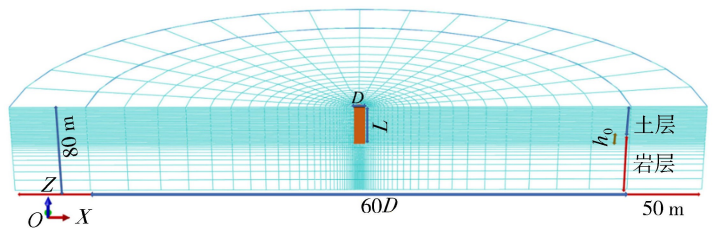


图1 弹性三维有限元模型示意图

Fig.1 Schematic diagram of elastic three-dimensional FEM model

在基岩处输入水平向Kobe地震波5~15 s的加速度时程曲线,比较弹性三维有限元模型与简化平面应变模型在桩顶与泥面以下 $3D$ 深度处的单桩速度时程曲线,见图2。结果表明,简化平面应变模型得到位移时程曲线的变化趋势与弹性三维有限元模型基本一致,因此可进一步用于非线性地震分析。

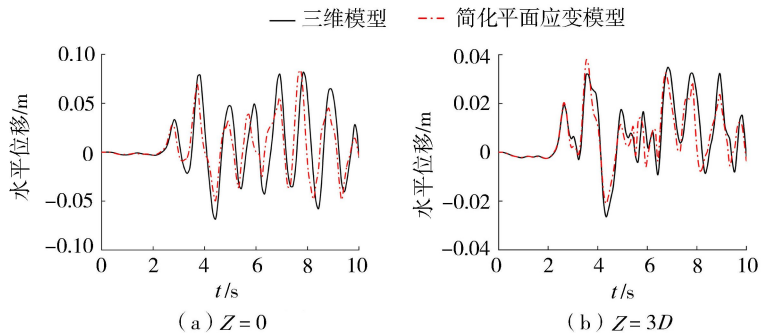


图2 弹性三维有限元模型与简化平面应变模型位移响应计算结果对比

Fig.2 Results comparisons of displacement response between three-dimensional model and plane strain model when materials are elastic

简化平面应变模型的水平计算区域取 $60D$ ,并在外围设置50 m无限元消除地震波反射的影响。 $D$ 取7 m;埋入深度 $L$ 取35 m,地基计算高度取80 m。通过改变上覆土层的深度来改变单桩 $h_0$ ,保证单桩入土深度与嵌岩深度总和不变,恒等于 $L$ ,见图3。土体性质相关参数 $A$ 、 $B$ 、 $\gamma_0$ 的取值参考文献[8]。单桩与岩、土的接触面采用主从面摩擦接触分析方法,桩-土-岩界面上,由刚度较大的单桩表面作为主控制接触面,岩、土表面作为从属接触面。接触对算法中采用面-面接触方法,该方法考虑了主从接触面的几何形状,同时考虑了从

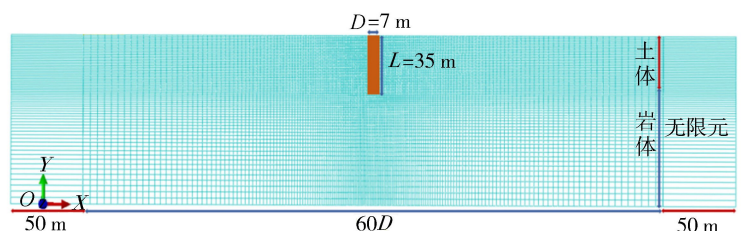


图3 简化平面应变有限元模型示意图

Fig.3 Schematic diagram of simplified plane strain FEM model



属接触面上周边节点的影响。黏弹性本构模型土体破坏主要由抗剪强度控制,此时接触面摩擦系数参考文献[36]取 0.6。

### 1.3 模型设置

对地震荷载作用下桩-土-岩相互作用影响因素的研究分为两步:①外荷载作用强度,通过调整输入水平地震波峰值加速度  $a_{\max}$ ,模拟大震、中震、小震 3 种情况,该方法参照文献[37];②桩-土-岩体系的物理参数设置见表 1。

### 1.4 基岩输入地震动调整

正确输入地震波荷载是计算结构在地震中动力响应的关键之一。采用基岩加速度作为地震波荷载输入的边界条件,在动力计算完成后一般会出现较大的残余变形,导致基岩面存在明显的基线漂移的情况。以 Kobe 波为例,加速度时程曲线在未经处理时输入基岩加速度,经计算得到的位移时程曲线在终点时刻存在非常大的残余偏移,导致结构出现被震飞的现象,这并不符合实际情况。本文对采集到的地震波数据通过滤波进行基线校准<sup>[38]</sup>以调整地震波,即对 Kobe 波进行傅里叶加速度谱分析,得到加速度谱振幅所在的主频率段,剔除非主频率段的波频得到校正后的加速度时程曲线,对加速度进行两次积分,得到位移时程曲线,以检验校正的有效性。

## 2 桩-土-岩地震反应关键参数影响分析

### 2.1 嵌岩深度

在进行地震波反应分析时,取 Kobe 波 5~15 s 的加速度时程曲线输入基岩面,改变嵌岩深度时保持岩体  $E_r$  为 2.5 GPa,水平地震波峰值加速度取 0.10g。

#### 2.1.1 单桩

沿桩身设置 6 个截面,与泥面的距离分别为 0~5D,提取各截面单桩的位移时程曲线与桩身加速度峰值作为分析对象,具体结果见图 4~6 和表 2。由图 4 和图 5 可以看出,选取的单桩截面距泥面越远,桩身的位移峰值越小;嵌岩深度较大时,各截面的位移相对差越小;取 3 种嵌岩深度下的桩顶位移进行比较,嵌岩深度越小,桩顶的整体位移越大,且地震波作用结束后的残余变形越大,这与岩层对桩身的嵌固作用(对桩身位移的限制)以及地震波在高强度介质中传播速度更快等原因有关。图 6 和表 2 表明,桩身各截面加速度峰值的变化规律与位移的变化规律相同,嵌岩深度从 0.5D 增加到 2D,桩顶峰值加速度减小 23.2%,峰值加速度沿深度减小越平缓。

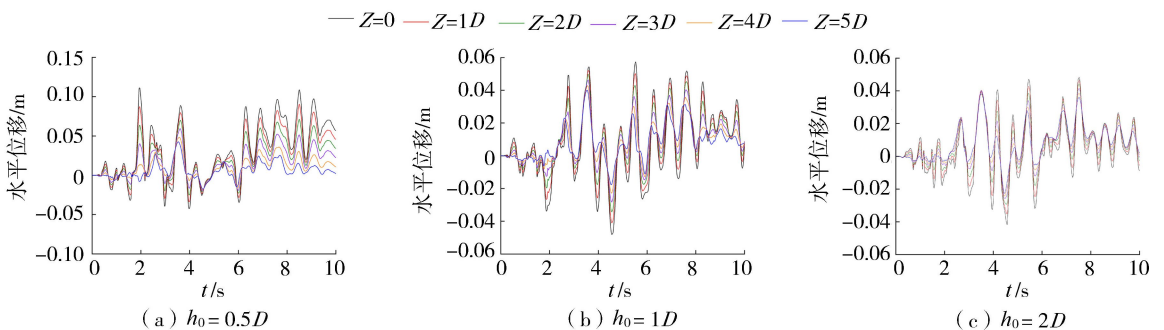


图 4  $h_0$  变化对单桩受地震荷载的水平位移的影响

Fig. 4 Influences of  $h_0$  variation on horizontal displacement of monopile under seismic loads

#### 2.1.2 桩土/桩岩相对位移

取嵌岩深度为 1D 的情况分析桩土/桩岩相对位移沿深度变化规律,如图 7 所示:桩身各截面的相对位移在地震波加速度首次突变的时间点(2 s 附近)前后达到最大值,之后相对位移不断减小,并在地震结束前 4 s 左右基本为 0;从桩顶到桩底的相对位移逐渐减小,嵌岩段的桩岩相对位移非常小;土岩交界面以上 1D 深度处至交界面范围内在地震结束后仍存在一定量的位移,但地震结束前 4 s 左右相对位移的数值逐渐稳



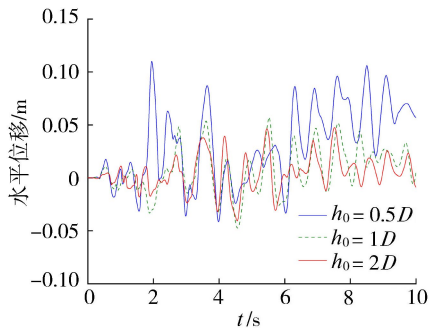


图5 桩顶位移对比

Fig. 5 Comparison of pile top displacement

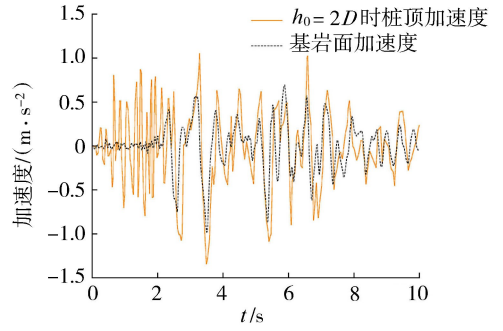


图6 桩顶加速度时程曲线

Fig. 6 Time history curve of pile top acceleration

表2 桩身加速度峰值及放大系数

Table 2 Peak values of pile acceleration and amplification factor along depth

$Z/D$	$h_0=0.5D$		$h_0=1D$		$h_0=2D$	
	加速度峰值/ $g$	放大系数	加速度峰值/ $g$	放大系数	加速度峰值/ $g$	放大系数
0	0.223	2.235	0.220	2.198	0.172	1.717
1	0.195	1.948	0.179	1.793	0.160	1.602
2	0.180	1.802	0.169	1.687	0.148	1.482
3	0.166	1.658	0.157	1.571	0.136	1.365
4	0.149	1.491	0.145	1.449	0.126	1.264
5	0.136	1.363	0.122	1.224	0.118	1.181

定。取  $Z=0$  和  $Z=3D$  截面处的桩土相对位移,研究嵌岩深度对其变化规律的影响,如图8所示,随着嵌岩深度的增加,桩土相对位移最大值越小,出现最大值的时间点相差不大。

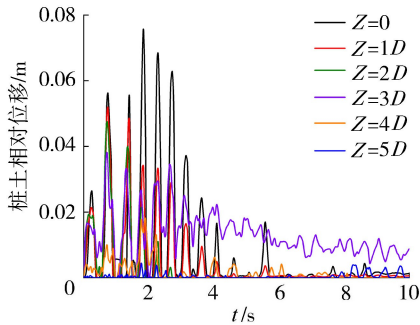
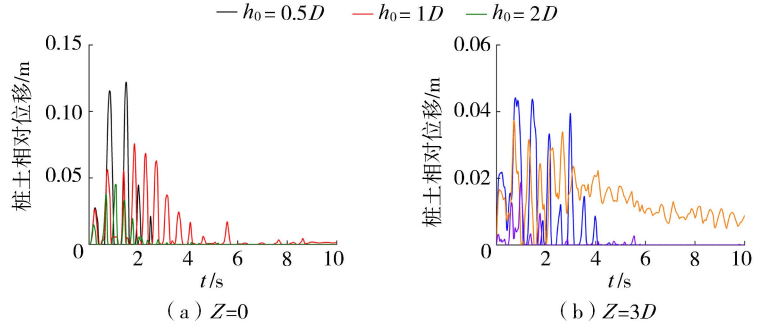


图7 桩土相对位移沿桩身变化规律

Fig. 7 Variations law of relative displacement between pile and soil along depth

图8  $h_0$ 变化对  $Z=0$  和  $Z=3D$  截面处桩土相对位移的影响Fig. 8 Influences of  $h_0$  variation on relative displacement between pile and soil at  $Z=0$  and  $Z=3D$ 

### 2.1.3 桩周岩土

取土体位移最大截面——泥面处的土体剪应力与剪应变瞬时值绘制土体变形滞回曲线,如图9所示。由图9可知,随着嵌岩深度从  $0.5D$  增至  $2D$ ,土体的剪应变极值减小 97.1%,剪应力极值减小 82.0%,滞回曲线形态由平行四边形退化为狭窄的梭形;土岩交界面处的岩体损伤量随着地震波荷载的推进而逐渐增加,嵌岩深度较小时,岩体损伤量在地震波荷载加速度首次突变的时间点附近开始发展,在水平地震波峰值加速度出现的时间点 3.5 s 附近损伤量有一个明显的增加,随着嵌岩深度的增加,损伤的发展变得更平缓。因此,嵌岩深度的增加能有效降低地震波荷载作用下桩-土-岩体系的动力响应,保障桩基安全。

## 2.2 岩体风化程度

保持嵌岩深度为  $1D$ ,水平地震波峰值加速度取  $0.10g$ 。

### 2.2.1 单桩

提取单桩不同截面位移时程曲线与桩顶加速度峰值作为分析对象,由图10和图11可知,岩石弹性模量越大,桩顶变形量越小;图12和表3表明,单桩加速度峰值沿桩身深度的增加而减小,随着岩石弹性模量的增大,加速度峰值的减小越平缓,分析其主要原因,地震波在岩体中的传播速度与岩体的弹性模量正相关,岩

体强度越大,横波传播速度越快,导致桩身各截面的变形更同步。

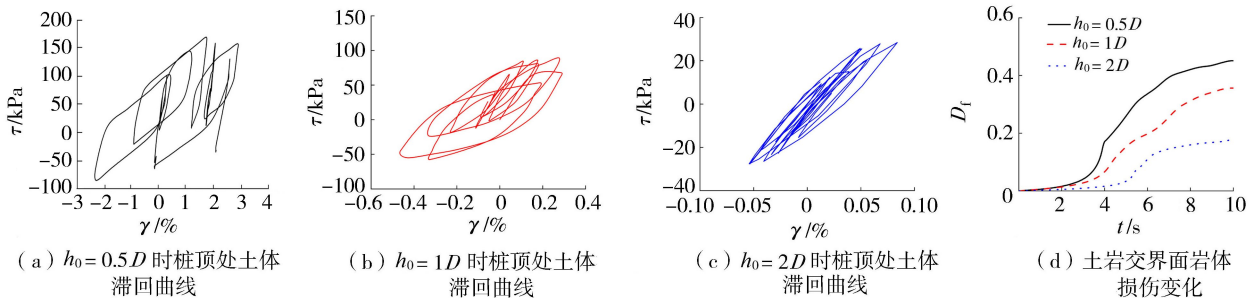


图 9  $h_0$ 变化对桩周岩土变形特性的影响

Fig. 9 Influences of  $h_0$  variation on deformation characteristics of rock and soil around monopile

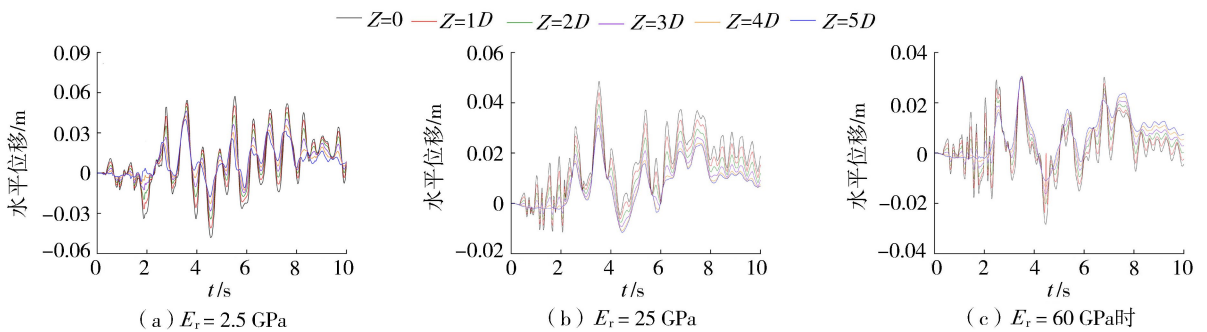


图 10  $E_r$ 变化对单桩受地震波荷载的水平位移的影响

Fig. 10 Influences of  $E_r$  variation on horizontal displacement of monopile under seismic loads

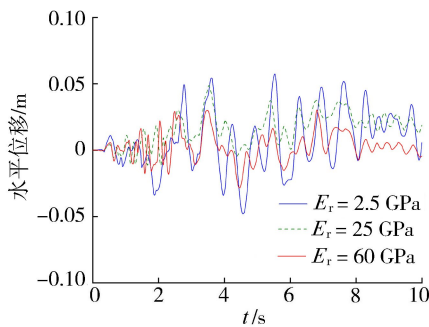


图 11 桩顶位移对比

Fig. 11 Comparison of pile top displacement

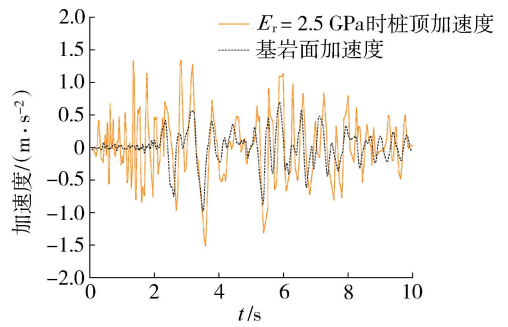


图 12 桩顶加速度时程曲线

Fig. 12 Time history curve of pile top acceleration

表 3 桩身各层加速度峰值及放大系数

Table 3 Peak values of pile acceleration and amplification factor along depth

$Z/D$	$E_r = 2.5 \text{ GPa}$		$E_r = 25 \text{ GPa}$		$E_r = 60 \text{ GPa}$	
	加速度峰值/g	放大系数	加速度峰值/g	放大系数	加速度峰值/g	放大系数
0	0.220	2.198	0.138	1.378	0.111	1.108
1	0.179	1.793	0.129	1.295	0.107	1.067
2	0.169	1.687	0.121	1.206	0.105	1.055
3	0.157	1.571	0.112	1.120	0.103	1.035
4	0.145	1.449	0.105	1.054	0.101	1.015
5	0.122	1.224	0.100	1.004	0.100	1.005

2.2.2 桩土/桩岩相对位移

由图 13 可知,随着岩体风化强度的减弱,桩土相对位移的最大值逐渐较小,在  $Z = 3D$  处地震结束后的残余位移几乎为 0。

2.2.3 桩周岩土

各地基桩顶处土体滞回曲线如图 14 所示。由图 14 可知,随着岩体风化程度减弱,桩身变形减小,桩周

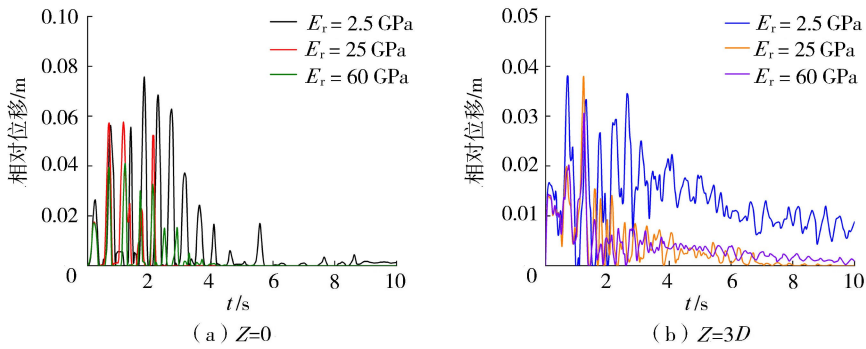


图 13  $E_r$  变化对  $Z=0$  和  $Z=3D$  截面处桩土相对位移的影响

Fig. 13 Influences of  $E_r$  variation on relative displacement between pile and soil at  $Z=0$  and  $Z=3D$

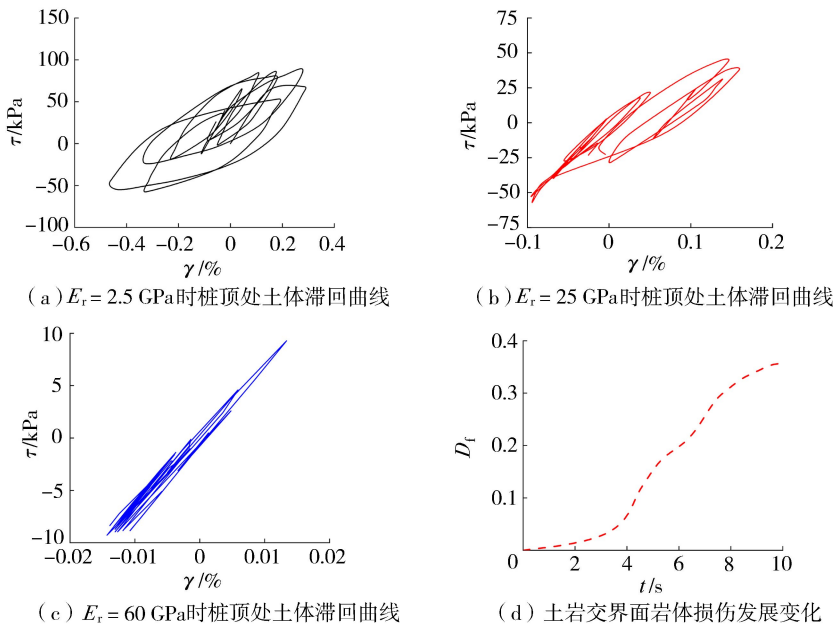


图 14  $E_r$  变化对桩周岩土变形特性的影响

Fig. 14 Influences of  $E_r$  variation on deformation characteristics of rock and soil around monopile

岩土强度衰减程度减弱,导致岩体  $E_r$  较大时桩周土体变形仍处在弹性阶段,滞回曲线的形状近似直线,当岩体  $E_r$  从 2.5 GPa 增加到 60 GPa 时,土体的剪应变极值减小 95.3%,剪应力极值减小 89.5%;桩身下半部分岩体在强风化情况下有一定损伤,在中风化、微风化情况下损伤几乎不存在。

### 2.3 地震波强度

保持嵌岩深度为  $1D$ ,岩体  $E_r$  为 2.5 GPa,分析输入基岩的水平地震波峰值加速度对嵌岩单桩响应的影

#### 2.3.1 单桩变形特性

由图 15 和图 16 可以看出,输入的  $a_{\max}$  越大,单桩变形响应沿深度分布的差值越大,地震结束后的残余变形越大; $a_{\max}$  越小,桩身变形越均匀。图 17 和表 4 表明,单桩的加速度峰值沿桩身深度的增加而减小,输入  $a_{\max}$  越大,单桩加速度峰值的减小越剧烈。

#### 2.3.2 桩土/桩岩相对位移

如图 18 所示,桩土相对位移的最大值随着地震波强度的增加而增大。在  $Z=0$  和  $Z=3D$  深度处,地震波作用结束前 2~4 s,桩土相对位移的差异逐渐减小并在地震作用结束后基本保持一致。

#### 2.3.3 桩周岩土

图 19 为地震强度对桩周岩土变形特性的影响。由图 19 可知,桩周岩土的变形规律取决于单桩对不同地震强度的动力响应:随着地震烈度的增加,桩顶处土体剪应力-剪应变滞回曲线的形态更加饱满,土体耗



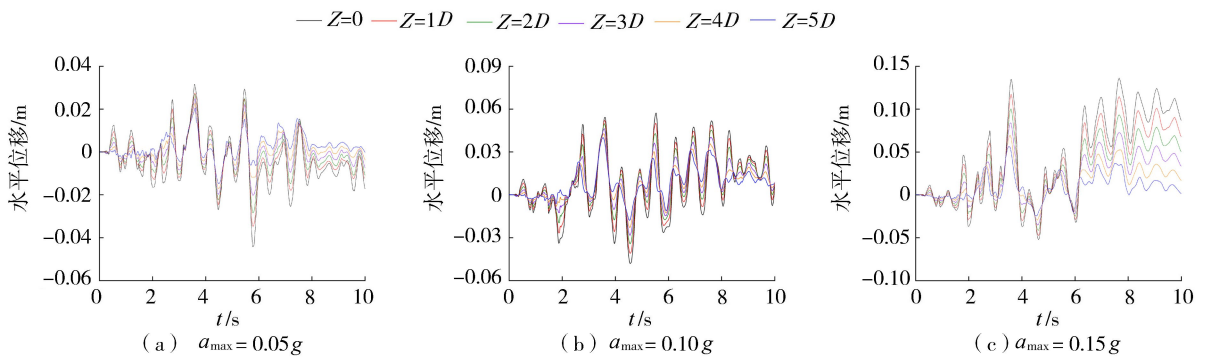


图 15  $a_{max}$  变化对单桩受地震荷载的水平位移的影响

Fig. 15 Influences of  $a_{max}$  variation on horizontal displacement of monopile under seismic loads

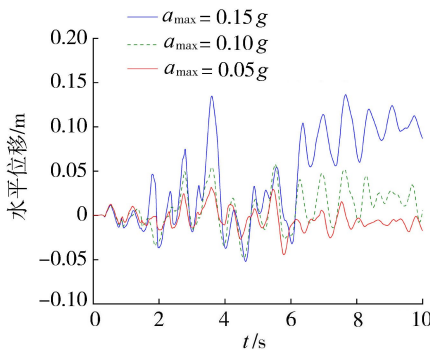


图 16 桩顶位移对比

Fig. 16 Comparison of pile top displacement

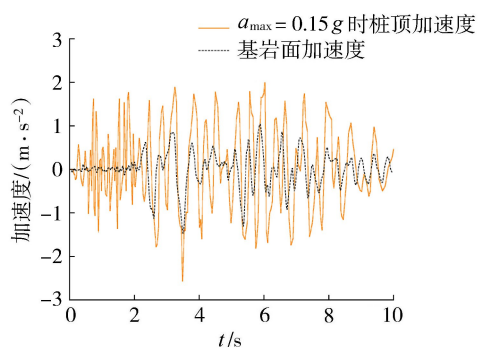


图 17 桩顶加速度时程曲线

Fig. 17 Time history curve of pile top acceleration

表 4 桩身各层加速度峰值及放大系数

Table 4 Peak values of pile acceleration and amplification factor along depth

Z/D	$a_{max}=0.05g$		$a_{max}=0.10g$		$a_{max}=0.15g$	
	加速度峰值/g	放大系数	加速度峰值/g	放大系数	加速度峰值/g	放大系数
0	0.096	1.926	0.220	2.198	0.431	2.874
1	0.089	1.779	0.179	1.793	0.380	2.533
2	0.081	1.621	0.169	1.687	0.326	2.172
3	0.078	1.560	0.157	1.571	0.277	1.847
4	0.070	1.395	0.145	1.449	0.229	1.529
5	0.062	1.233	0.122	1.224	0.197	1.313

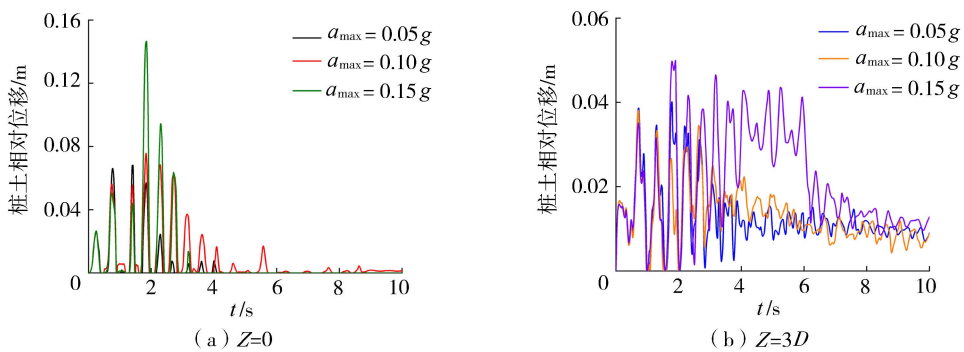


图 18  $a_{max}$  变化对 Z=0 和 Z=3D 截面处桩土相对位移的影响

Fig. 18 Influences of  $a_{max}$  variation on relative displacement between pile and soil at Z=0 and Z=3D

散的振动能量越多。当  $a_{max}$  从 0.15g 减至 0.05g, 土体剪应变极值减小 89.4%, 剪应力极值减小 35.6%; 当地震烈度较大时, 土岩交界面处岩体损伤量在地震波峰值加速度时间点附近的损伤量变化越大, 地震结束前 2~4s 由于基岩处地震波加速度形式相同且值相差很小, 岩体损伤发展趋势减缓。

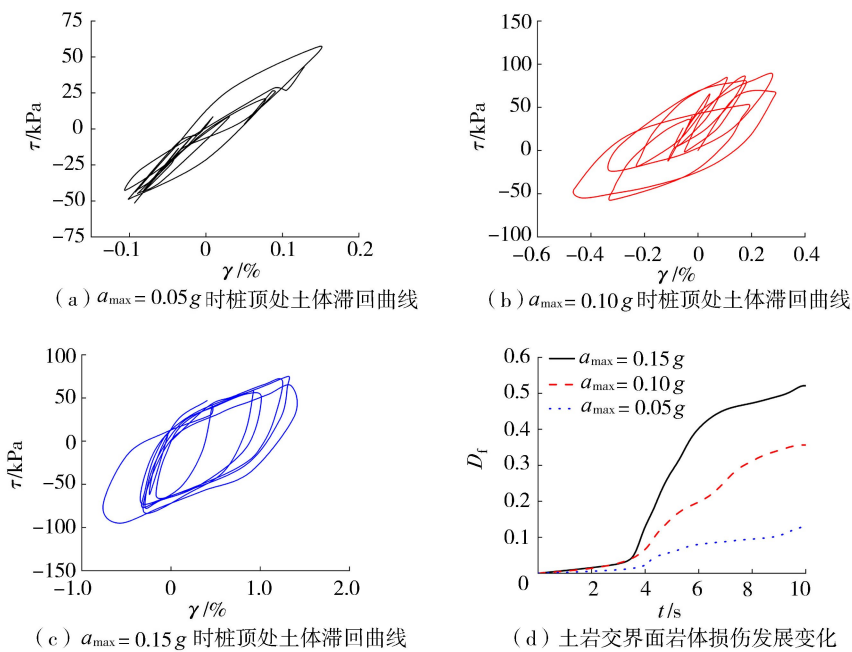


图 19  $a_{\max}$  变化对桩周岩土变形特性的影响

Fig. 19 Influences of  $a_{\max}$  variation on deformation characteristics of rock and soil around monopile

### 3 结 语

本文采用平面应变模型计算了地震荷载作用下嵌岩单桩与桩周土体、岩体的动力相互作用问题,结果表明,单桩嵌入岩层越深,桩身的整体位移与桩土相对位移均减小,桩周土体剪应力-剪应变关系由滞回型变为直线型,土岩交界面处岩体损伤的发展变得更平缓;岩体风化程度越小,桩顶变形越小,单桩位移时程曲线与加速度极值沿深度分布的差异越小,桩端岩体在岩石风化程度较高时出现明显的损伤;地震烈度越大,地震结束后单桩残余变形越大,岩体损伤量在地震波加速度峰值出现的时间点变化越剧烈。

### 参考文献:

- [1] HE R,JI J,ZHANG J,et al. Dynamic impedances of offshore rock-socketed monopiles[J]. Journal of Marine Science and Engineering,2019,7(5):134.
- [2] 朱光华. 福建省海上风电发展规划探讨[J]. 能源与环境,2012(5):5-7. (ZHU Guanghua. Discussion on Fujian offshore wind power development plan[J]. Energy and Environment,2012(5):5-7. (in Chinese))
- [3] 贺瑞,王海宇,郑金海. MICP 加固对海上风机单桩基础静力特性的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(3):65-73. (HE Rui, WANG Haiyu, ZHENG Jinhai. Influence of MICP reinforcement on static properties of monopiles of offshore wind turbine[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2022,50(3):65-73. (in Chinese))
- [4] 郑金海,丁星宇,管大为,等. 循环荷载作用下海上风机单桩基础周围砂土沉降与对流特性[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020,48(6):552-561. (ZHENG Jinhai, DING Xingyu, GUAN Dawei, et al. Characteristics of soil subsidence and convective motion around offshore windfarm monopile foundations subjected to long-term cyclic loading[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2020,48(6):552-561. (in Chinese))
- [5] GAO Z,SAHA N,MOAN T,et al. Dynamic analysis of offshore fixed wind turbines under wind and wave loads using alternative computer codes[C] //Proceedings of the 3rd EAWC Conference. Crete;EAWC,2010.
- [6] VOORMEEREN S N,VANDERVALK P L C,NORTIER B P,et al. Accurate and efficient modeling of complex offshore wind turbine support structures using augmented superelements[J]. Wind Energy,2014,17:35-54.
- [7] BANERJEE A,CHAKRABORTY T,MATASAGAR V. Stochastic dynamic analysis of an offshore wind turbine considering soil-structure interaction[J]. Advances in Structural Engineering,2014,10:673-687.
- [8] IBSEN L B,LINGAARD M. Prototype bucket foundation for wind turbines; natural frequency estimation[R]. Aalborg;Aalborg University,2006.
- [9] NAGGAR M H E,NOVAK M. Effect of foundation nonlinearity on modal properties of offshore towers[J]. Journal of Geotechnical

- Engineering,1995,121(9):660-668.
- [10] 陈学良,金星,陶夏新,等.土体动力一维非线性本构关系剖析与评价[J].地震工程与工程振动,2006,26(6):147-157. (CHEN Xueliang, JIN Xing, TAO Xiaxin, et al. Analysis and evaluation of one dimensional dynamic nonlinear constitutive relation of soil[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2006, 26(6):147-157. (in Chinese))
- [11] 庄海洋.土-地下结构非线性动力相互作用及其大型振动台试验研究[D].南京:南京工业大学,2006.
- [12] 刘齐建.软土地铁建筑结构抗震设计计算理论的研究[D].上海:同济大学,2005.
- [13] 荣棉水,李红光,李小军,等. Davidenkov 模型对海域软土的适用性研究[J].岩土工程学报,2013(增刊2):596-600. (RONG Mianshui, LI Hongguang, LI Xiaojun, et al. Applicability of Davidenkov model for soft soils in sea areas[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013(Sup2):596-600. (in Chinese))
- [14] HE R, KAYNIA A M, ZHANG J, et al. Seismic response of monopiles to vertical excitation in offshore engineering[J]. Ocean Engineering, 2020, 216:107596.
- [15] HE R, KAYNIA A M, ZHANG J. Lateral free-field responses and kinematic interaction of monopiles to obliquely incident seismic waves in offshore engineering[J]. Computers and Geotechnics, 2021, 132:103956.
- [16] RISI R D, BHATTACHARYA S, GODA K. Seismic performance assessment of monopile-supported offshore wind turbines using unscaled natural earthquake records[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2018, 109:154-172.
- [17] 李亚洲,孔德森,董利.地震荷载下大直径单桩基础承载特性影响因素分析[J].科学技术与工程,2020,20(26):10881-10887. (LI Yazhou, KONG Desen, DONG Li. Analysis of factors affecting bearing capacity of large diameter single piles of offshore wind power under earthquake loads[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(26):10881-10887. (in Chinese))
- [18] HNLER M, RITSCHEL U, WARNKE I. Systematic modelling of wind turbine dynamics and earthquake loads on wind turbines [R]. Citeseer; European Wind Energy Conference and Exhibition, 2006:1-6.
- [19] 高盟,徐晓,王滢,等.大直径扩底灌注桩的地震反应特性[J].地震工程与工程振动,2018,38(3):9. (GAO Meng, XU Xiao, WANG Ying, et al. The seismic response performance of large-diameter belled pile [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2018, 38(3):9. (in Chinese))
- [20] CHEN W, HUANG L, XU L, et al. Numerical study on the frequency response of offshore monopile foundation to seismic excitation[J]. Computers and Geotechnics, 2021, 138(11):104342.
- [21] MO Renjie, CAO Renjing, LIU Minghou, et al. Effect of ground motion directionality on seismic dynamic responses of monopile offshore wind turbines[J]. Renewable Energy, 2021, 175:179-199.
- [22] 席仁强,杜修力,王丕光,等.单桩式海上风力机整体化地震反应[J].浙江大学学报(工学版),2021,55(4):757-766. (XI Renqiang, DU Xiuli, WANG Piguang, et al. Integrated seismic response of monopile supported offshore wind turbines[J]. Journal of Zhejiang University(Engineering Science), 2021, 55(4):757-766. (in Chinese))
- [23] BANERJEE S, LEE F H. Centrifuge shaking table tests on a single pile embedded in clay subjected to earthquake excitation[J]. International Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 7(2):117-123.
- [24] WILSON D W, BOULANGER R W, KUTTER B L. Observed seismic lateral resistance of liquefying sand [J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 2000, 126(10):898-906.
- [25] 陈国兴,庄海洋.基于 Davidenkov 骨架曲线的土体动力本构关系及其参数研究[J].岩土工程学报,2005,27(8):860-864. (CHEN Guoxing, ZHUANG Haiyang. Developed nonlinear dynamic constitutive relations of soils based on Davidenkov skeleton curve[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(8):860-864. (in Chinese))
- [26] 吴明白,殷亚娟.岩石损伤本构模型及稳定性分析中的应用[J].科学技术与工程,2015(12):98-102. (WU Mingbai, YIN Yajuan. Damage constitutive model and stability analysis of application[J]. Science Technology and Engineering, 2015(12):98-102. (in Chinese))
- [27] 梅胜尧,王伟,秦志军,等.考虑裂隙塑性的岩石非线性分数阶蠕变模型[J].河海大学学报(自然科学版),2019,47(6):548-554. (MEI Shengyao, WANG Wei, QIN Zhijun, et al. A nonlinear creep model based on fractional order theory considering the plasticity of fissures for rocks[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2019, 47(6):548-554. (in Chinese))
- [28] HARDIN B O, DRNEVICH V P. Shear modulus and damping in soils design equations and curves[J]. Journal of Soil Mechanics and Foundation, ASCE, 1972(7):603-642.
- [29] MARTIN P P, SEED H B. One dimensional dynamic ground response analysis[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1982(7):935-954.
- [30] 杨军,任光,于琦,等.台阶爆破岩石破碎楔块理论及数值模拟研究[J].爆破,2015,32(3):55-61. (YANG Jun, REN Guang, YU Qi, et al. Wedge theory of rock fragmentation for bench blasting and its numerical simulation[J]. Blasting, 2015, 32(3):55-61. (in Chinese))



- [31] NOVAK M, BEREDUGO Y O. Vertical vibration of embedded footings[J]. ASCE Soil Mechanics and Foundation Division Journal, 1972, 98(12):1291-1131.
- [32] NOVAK M, NOGAMI T, ABOUL-ELLA F. Dynamic soil reactions for plane strain case[J]. Journal of the Engineering Mechanics Division, 1978, 13(4):231-236.
- [33] KONAGAI K, NOGAMI T. Time-domain axial response of dynamically loaded pile groups[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1987, 13(3):417-430.
- [34] KONAGAI K, NOGAMI T. Subgrade model for transient response analysis of multiple embedded bodies[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1994, 23(10):1097-1114.
- [35] 王奎华, 杨冬英, 张智卿. 简化平面应变土体模型的精度研究及适用性分析[J]. 计算力学学报, 2010(3):5. (WANG Kuihua, YANG Dongying, ZHANG Zhiqin. A study on precision of simplified plane strain model of soil[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2010(3):5. (in Chinese))
- [36] 许宏发, 王斌, 戴小平, 等. 桩土接触面力学参数取值研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2001, 29(增刊1):54-56. (XU Hongfa, WANG Bin, DAI Xiaoping, et al. Determination of mechanical parameters on pile-soil interface[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2001, 29(Sup1):54-56. (in Chinese))
- [37] MARTIN P P, SEED H B. One dimensional dynamic ground response analysis[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1982(7):935-954.
- [38] 李建波. 结构-地基动力相互作用的时域数值分析方法研究[D]. 大连:大连理工大学, 2005.

(收稿日期:2022-02-23 编辑:胡新宇)

(上接第65页)

- [10] 徐体兵, 孙双科. 竖缝式鱼道水流结构的数值模拟[J]. 水利学报, 2009, 40(11):1386-1391. (XU Tibing, SUN Shuangke. Numerical simulation of vertical slot fishway[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(11):1386-1391. (in Chinese))
- [11] 边永欢, 孙双科. 竖缝式鱼道的水力特性研究[J]. 水利学报, 2013, 44(12):1462-1467. (BIAN Yonghuan, SUN Shuangke. Hydraulic characteristics research of vertical slot fishway[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(12):1462-1467. (in Chinese))
- [12] 张国强, 孙双科. 竖缝宽度对竖缝式鱼道水流结构的影响[J]. 水力发电学报, 2012, 31(1):151-156. (ZHANG Guoqiang, SUN Shuangke. The impact of vertical slot width on the flow structure in vertical slot fishway[J]. Hydroelectric Engineering, 2012, 31(1):151-156. (in Chinese))
- [13] 董志勇, 冯玉平, ERVINE A. 同侧竖缝式鱼道水力特性及放鱼试验研究[J]. 水力发电学报, 2008, 27(6):121-125. (DONG Zhiyong, FENG Yuping, ERVINE A. Experimental study on hydraulic characteristics of the ipsilateral vertical slot fishway[J]. Hydroelectric Engineering, 2008, 27(6):121-125. (in Chinese))
- [14] 董志勇, 冯玉平, ERVINE A. 异侧竖缝式鱼道水力特性及放鱼试验研究[J]. 水力发电学报, 2008, 27(6):126-130. (DONG Zhiyong, FENG Yuping, ERVINE A. Experimental study on hydraulic characteristics of the opposite ipsilateral vertical slot fishway[J]. Hydroelectric Engineering, 2008, 27(6):126-130. (in Chinese))
- [15] WU S, RAJARATNAM N, KATOPODIS C. Structure of flow in vertical slot fishway[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1999, 125(4):351-360.
- [16] FUJIHARA M, YAMANAKA S, IZUMI T, et al. Numerical investigation of flow in various types of vertical slot fishways and the function of baffles[J]. The Japanese Society of Fisheries Engineering, 2012, 49(2):85-92.
- [17] 汪红波, 王从峰. 横隔板式鱼道水力特性数值模拟研究[J]. 水电能源科学, 2012, 30(5):65-68. (WANG Hongbo, WANG Congfeng. Numerical simulation of hydraulic characteristics on horizontal diaphragms fishway[J]. Hydroelectric Energy, 2012, 30(5):65-68. (in Chinese))
- [18] 罗小凤, 李嘉. 竖缝式鱼道结构及水力特性研究[J]. 长江科学院院报, 2010, 27(10):50-54. (LUO Xiaofeng, LI Jia. Structure and hydraulic characteristics research of vertical slot fishway[J]. Yangtze River Scientific Research Institute, 2010, 27(10):50-54. (in Chinese))
- [19] 曹娜, 钟治国, 曹晓红, 等. 我国鱼道建设现状及典型案例分析[J]. 水资源保护, 2016, 32(6):156-162. (CAO Na, ZHONG Zhiguo, CAO Xiaohong, et al. Status of fishway construction in China and typical case analysis[J]. Water Resources Protection, 2016, 32(6):156-162. (in Chinese)).
- [20] 刘超, 张世宝, 王二平, 等. 鳊鱼道堰面加糙的过鱼效果评价[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020, 48(2):136-142. (LIU Chao, ZHANG Shibao, WANG Erping, et al. Study on elver passing efficiency for weir surface roughing of eel channel[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2020, 48(2):136-142. (in Chinese))

(收稿日期:2021-12-03 编辑:胡新宇)