张启志.多因素复杂参数下的圆形地下水泥土桩地基场地地震效应分析[J].地震工程学报,2018,40(3):458-465.doi:10.3969/ j.issn.1000-0844.2018.03.458

ZHANG Qizhi.Seismic Site Effect of Circular Underground Cement—Soil Pile Foundation Considering Multi-factor and Complex Parameters[J].China Earthquake Engineering Journal, 2018, 40(3): 458-465.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2018.03.458

# 多因素复杂参数下的圆形地下水泥土桩 地基场地地震效应分析

### 张启志

(黄淮学院建设工程公司,河南 驻马店 463000)

摘要:为了实现圆形地下水泥土桩地基场地地震效应的准确分析,提高建筑抗震性能,采用 ABAQUS有限元软件,分析不同随机参数的圆形地下水泥土桩地基场地地震效应,分析运算采用 的各项参数、场地地质条件以及明确等效复合土体计算参数,通过二维复合模量简化模型,全面考 虑加固深度、土桩地基上新建结构、下卧基岩地形、水泥土模量、输入地震波属性和不同场景环境等 随机参数对圆形地下水泥土桩地基场地地震效应的影响。实验结果表明:圆形地下水泥土桩地基 加固区地表的峰值加速度反应较自由场的反应显著降低,地基地表的峰值加速度反应随着水泥土 桩加固深度和复合模量的增加而减小;地基上新建结构对坝基周围场地地震动特性形成较强的干 扰,干扰幅度以及区域同新建结构规模具有较高的关联性;地基下端基岩表面地形同上部地基场地 地震动特性间具有一定的关联性;场地土层条件对复合地基地震效应影响较大;桩体模量在可能变 化范围内,对水泥土桩地基地震效应影响相对较小。

关键词:多因素复杂参数;圆形地下水泥;土桩地基;场地;地震效应

 中图分类号:
 TU435
 文献标志码:A
 文章编号:
 1000-0844(2018)03-0458-08

 DOI:
 10.3969/j.issn.1000-0844.2018.03.458

## Seismic Site Effect of Circular Underground Cement—Soil Pile Foundation Considering Multi-factor and Complex Parameters

#### ZHANG Qizhi

(Henan Construction Engineering Co. Limited Liability Company of Huanghuai University, Zhumadian 463000, Henan, China)

**Abstract**: To accurately analyze the seismic site effect of circular underground cement—soil pile foundations and improve the seismic performance of buildings, in this study, we used ABAQUS finite element software to analyze the seismic effect on circular underground cement—soil pile foundations with different random parameters. Specifically, we analyzed the parameters used in the calculation, the geological conditions of the site, and the equivalent composite soil parameters. Using a simplified model of a two-dimensional composite modulus, we discuss the influences

E-mail:13939676800@163.com。

收稿日期:2017-08-20

基金项目:河南省科技攻关项目,名称:基于钻孔灌注桩联合导管注浆的既有高速公路软基修复技术的研究(豫科鉴委字【2016】第 804号)

作者简介:张启志(1968-),男,河南驻马店人,高级工程师,研究方向:建设工程施工与工程项目管理。

of the reinforcement depth, a newly built structure on the foundation, the topography of the underlying bedrock, and some random parameters (e.g., modulus of cement soil, seismic attributes, and different scenes) on the seismic site effect. The experimental results show that the peak acceleration response on the circular underground cement—soil pile foundation decreases with increased reinforcement depth of the cement—soil pile and composite modulus, and is significantly lower than that on a free field. A new structure on the foundation experiences a strong disturbance in the ground motion characteristics around the foundation, and the interference amplitude and area have a high correlation with the structure scale. We found a certain correlation between the bedrock terrain at the bottom of the foundation and the ground motion characteristics of the upper foundation. The influence of soil conditions on the seismic effect of the composite foundation is great, whereas the influence of the pile modulus is relatively small.

Key words: multi-factor and complex parameters; circular underground cement; soil pile foundation; site; seismic effect

#### 0 引言

软土地基曾经是被普遍使用的一种地基,然 而,一种新型的工程性质优越的复合地基在我国一 些经济发达的地区悄然出现,这种地基是对软土地 基进行一些工程处理之后获得的,圆形地下水泥土 桩地基就是其中使用率非常高的复合型地基<sup>[1]</sup>。 由于我国某些地区处于地震多发地带,这种自然灾 害给我们的生产生活带来了巨大的损失与灾难,针 对此类情况,很多专家学者对地震效应进行了相关 的研究。

喻豪俊等<sup>[2]</sup>以西南山区典型输电线路场为研究对象,运用 FLAC3D 数值分析软件,采用时程分 析方法,研究了场地峰值加速度加速度因子,场地 永久位移与覆盖层厚度和基岩厚度的变化特征分 析强度。结果表明,随着覆盖层厚度的增加,场地 峰值加速度的变倍因子逐渐减小,永久位移逐渐增 大。但该方法具有地域局限性,分析结果不准确。 侯春林等<sup>[3]</sup>选取 AP1000 核岛结构标准设计地基 的 5 种场地参数,开展了场地非线性地震反应的计 算分析。计算分析中,以不同的地震动输入界面作 为计算基底,并分别以不同持时的人工地震动加速 度时程作为输入地震动。但是该方法对地震动持 时也可能对非基岩核电厂抗震设防产生的影响考 虑不全。

圆形地下水泥土复合地基的地震效应规律的研 究具备了更专业和突出的研究价值和社会实践作 用。为了提高圆形地下水泥土桩地基场地地震效应 分析的精度,采用 ABAQUS 有限元软件,分析不同 随机参数的圆形地下水泥土桩地基场地地震效应。

## 具有随机参数的圆形地下水泥土桩地基 复合模量模型地震效应分析

#### 1.1 ABAQUS 有限元软件简介

本文采用有限元软件 ABAQUS,采用复合模量 法塑造圆形地下水泥土桩地基的二维有限元模型, 并利用二维复合模量简化模型,全面考虑加固深度、 土桩地基上新建结构、下卧基岩地形、水泥土模量、 输入地震波属性和不同场景环境等随机参数对圆形 地下水泥土桩地基场地地震效应的影响<sup>[4]</sup>。 ABAQUS 是一种模拟运算方法,可处理应力以及 位移等结构问题。二维有限元模型的运算范围是: 设置运算域宽度时,加固外围土体运算域宽度比原 有加固范围宽度高5倍,此时模型高度为地表到基 岩的土层厚度。

#### 1.2 计算方法和参数

文章通过依据 Biot 固结原理的有效应力研究 方法,采用邓肯 E-B 模型对土体静应力应变关系实 施描述,进而明确场地动力反应分析的原始应力场。 邓肯 E-B 模型的表达式为:

$$E_{t} = [1 - R_{j}S]^{2}KP_{a} \left(\frac{\sigma_{3}}{P_{a}}\right)^{n},$$
$$S = \frac{(\sigma_{1} - \sigma_{3})(1 - \sin\sigma)}{2C\cos\varphi + 2\sigma_{3}\sin\varphi}$$

式中: $\sigma$ 为围压;S为应力水平;K、n为变形模量参数; $R_i$ 、 $\varphi$ 为线性强度参数; $P_a$ 为大气压力。

通过等价黏弹性模型对土体动力变形的黏滞性 实施分析,采用等价线性化动力研究方法对土体动 力变形的动态属性进行描述。土体的关键指标以及 静动力属性参数如表1、表2所列。

表 1	场地土主要物理属性指标以及(邓肯 E-B 模型)静力属性参数	
-----	--------------------------------	--

Table 1 Main physical properties and static attribute parameters of site soil (Duncan E-B model)

土层材料	天然密度	强度参数			变形模	量参数	体积模量参数	
	$/(g \cdot cm^{-3})$	$arphi_{0}^{'}/(^{\circ})$	$\Delta arphi'/(^\circ)$	$R_{j}$	K	n	$K_{b}$	m
粗砂	1.98	52.4	8.9	0.8	1 028	0.28	806	-0.15
细砂	1.48	29.6	0	0.5	176	0.65	135	0.18

#### 表 2 场地土关键(等价黏弹性模型)动力属性参数

Table 2 Dynamic attribute parameters of site soil

(	equivalent	viscoelastic	model)
	equi an enere		mouth

土层材料	$K_{2}$	$\lambda_{\rm max}/\%$	$\mu_{ m d}$	$K_{1}$	n
粗砂	3 895.1	10.1	0.55	20.1	0.56
细砂	680.1	9.1	0.55	20.6	0.64

划分网格是建立有限元模型的一个重要环节, 需要的工作量较大,所划分的网格形式对计算精度 和计算规模将产生直接影响。有限元网格划分是进 行有限元数值模拟分析至关重要的一步。边界规范 以及网络分割:模型的底端是基岩,发生地震时地震 波是水平传输。分析水平地震波运动对土层形成的 剪切运动,模型两端使用的是截断边缘中单元节点 在水平方向上的自由传输,竖直方向具有限制作用, 并对地震作用进行效应分析<sup>[5]</sup>。模型内的网格单元 种类在水平面将其变换成四节点单元(CPE4R),详 细的网络分割情况如图 1 所示,有限元的网格划分 如图 2 所示。

#### 1.3 场地地质条件

基于土层分布状态,采集的某真实工程场地条件 如表 3 所列,通过某工业大学研发的 GZZ-型自振柱 试验机对原状土进行实验,得到不同土的参考剪应变 γ<sub>r</sub>、土的容量γ以及平均剪切波速v<sub>s</sub>。Davidenkov

		L1:3 000
<u>5a</u>	* * *	5 <i>a</i>
È T T T T T T		

图1 圆形地下水泥土桩地基复合模量有限元模型

Fig.1 Finite element model of the composite modulus of circular underground cement—soil pile foundation



. \_

			0 0				
土层编号	土层描述	层厚/m	$Y/(kN \cdot m^{-2})$	$v_{\rm S}/({\rm m} \cdot {\rm s}^{-1})$	$\gamma_r$	A	В
1	素填土(流塑)	1.9	18.9	123.1	0.000 4	1.13	0.46
2	(流塑)	4.8	18.5	108.7	0.000 3	1.13	0.46
3	粉土与粉砂互层(稍密一松散)	2.7	19.1	129.7	0.000 26	1.16	0.356
4	粉质粘土(夹粉砂,稍密)	5	19.9	169.5	0.000 27	1.11	0.47
5	粉质粘土(夹粉砂,稍密)	5.2	21.6	171.4	0.000 33	1.11	0.47
6	粉细砂(局部夹粉土,稍一中密)	16.5	19	205.5	0.000 5	1.19	0.46
7	粉细砂(局部夹粉土,中密)	11.4	18.9	240.1	0.004 6	1.2	0.46
8	粉细砂(局部夹粉土,中一密实)	2.1	21.1	215.5	0.000 38	1.2	0.46
9	粉细砂夹砾砂(中-密实)	3.3	22.3	277.2	0.000 35	1.26	0.46
10	全风化花岗岩(极软岩)	4.6	45.2	381.4	0.007 2	2.35	0.71
11	强风化花岗岩(较硬岩)	3.9	60.4	453.9	0.008 1	2.48	0.79

 Table 3
 Engineering site conditions

表 3

工程场地条件

土体模型的表达式为  $H(\gamma) = \left\{ \frac{(\gamma/\gamma_0)^{2B}}{\left[1 + (\gamma/\gamma_0)\right]^{2B}} \right\}^A$ ,

同时给出 Davidenkov 土体模型内的参数 A 和参数 B 值。泊松比是指材料在单向受拉或受压时,横向

正应变与轴向正应变的绝对值的比值,也叫横向变 形系数,它是反映材料横向变形的弹性常数。对于 传统材料,在弹性工作范围内,μ 一般为常数,但超 越弹性范围以后,μ 随应力的增大而增大,直到μ= 0.5 为止,所以本文设置泊松比 μ 是 0.4<sup>[6]</sup>。

#### 1.4 等效复合土体计算参数确定

确定圆形地下土桩地基土层地震反应分析的等效参数<sup>[7]</sup>,设置圆形地下水泥土桩地基的置换率是m,不同等效参数参考地基的等效符合压缩模量 $E_c$ = $mE_p$ +(1-m) $E_s$ , $E_c$ 表示复合土体的压缩模量, $E_p$ 表示水泥土桩的压缩模量, $E_s$ 表示原状土体的压缩模量。

地基等效复合密度以及动剪切模量是  $\rho_c = m\rho_p$ +(1-m) $\rho_s$ 和  $G_c = mG_p$ +(1-m) $G_s$ ,地基等效泊 松比是  $\mu_c = m\mu_p$ +(1-m) $\mu_s$ ,其中下标 c 是地基的 等效值,p 用于描述水泥土桩对应值,s 是原状土对 应值。

因为水泥土桩的密度同原状图的密度基本一致,将加固后的地基等效密度当成原状土的密度值。 基于 $G_p$ 、 $G_s$ 运算出地基等效剪切模量, $G_s = \rho_s v_s^2$ 和  $G_p = E/2(1 + \mu_p)$ ,其中 $v_s$ 表示原状土的剪切波速 值,E表示水泥土桩动弹性模量, $\mu_p$ 表示水泥土桩 的泊松比。

#### 1.5 输入地震动

本文输入地震是向场地实施人工地震波,设置 基岩水平向的加速度峰值是 0.286g,地震动持时 24 s,反应谱特征周期为 0.35 s,地震加速度如图 3 所示。



Fig.3 Time history of the input ground motion

## 2 不同随机参数的圆形地下水泥土桩地基 场地地震效应数值模拟分析

分析圆形地下水泥土桩地基在不同随机参数下

的地震效应<sup>[8-9]</sup>,如深度、土桩地基上新建结构、桩体 模量和场地条件。

#### 2.1 加固深度对复合地基地震效应的影响

本文研究当加固宽度是 5 mm 的地基在不同圆 形水泥土桩加固深度情况下的地震效应。不同圆形 地下水泥土桩加固深度情况下地表不同点的位移峰 值如图 4 所示。不同圆形地下水泥土桩加固深度情 况下加固范围中心的位移峰值如图 5 所示。分析图 4 能够看出,图中的位移曲线变化稳定,在相同加固 深度情况下加固区同非加固区的地表位移峰值基本 一致。由图 5 能够得出,加固深度逐渐提升,加固区 中心地表位移峰值变化无序。当加固深度是 14 m 时,加固范围中心位移峰值降低。说明加固场地提 高了地表位移峰值,但是最优加固深度可确保固定 地表位移峰值变化成最小值。



图4 差异加固深度情况下地表不同点位移峰值

Fig.4 Peak displacement of different points on the surface at different reinforcement depths



地表位移峰值

Fig.5 Peak displacement of reinforcement area center at different reinforcement depths

分析图 6 能够看出加固范围地表加速度峰值小 于自由场,加固深度从 5 m 提升到 18 m 后,加固范 围地表中心的加速度峰值从 12%降低到 32%,出现 了大幅度降低;分析图 7 可得,加固深度在 10 m 以 及 14 m 的情况下,加固区地表加速度峰值波动较 低。综合分析能够得出,场地地表加速度峰值随着 加固深度的提升而降低。加固范围内部地表加速度 峰值变化平稳,而外端地表加速度峰值在加固区距 离较高的位置上不断提升,并且加固深度越高,速度 峰值波动越显著。当加固在 14 m 以及 18 m 情况 下,加固范围外地地表加速度峰值比自由场高,使得 加固外端建筑物抗震能力降低。







图 7 地表各点加速度峰值随加固深度的波动情况 Fig.7 Change of peak acceleration at different points with reinforcement depth

#### 2.2 土桩地基上新建结构对场地地震动特性的影响

某规范场地模型上塑造大坝一深厚土桩地基圆 形地下水泥土桩地基系统模型,该地基上新建的土 石坝高度是40m,坝体材料同土桩地基粗砂一致, 分析地基中新建大坝对土桩地基地震属性的干 扰<sup>[10-12]</sup>,构建土石坝前后大坝-地基系统垂直中心线 内结点振动相对加速度情况以及加速度放大倍数排 列情况,分别如图8、图9所示。

分析上述两图能够看出,在土桩地基上塑造土 石坝后,其地震动特性出现波动,建坝后地基加速度 反应被约束,在高程为 80~100 m 之间,建坝前后 的加速度放大倍数差异最大,最大差值达到0.5,建 坝后坝体下地基中竖直向上加速度放大倍数排列曲 线未出现显著波动;坝体对底层内部结构振动加速 度反应谱干扰程度较低,坝体对原场地地表谱形的 地震动干扰度也较低。综合分析可得,新建结构对 土桩地基地震动特性干扰程度以及区域,同新建结 构的大小具有一定的联系,新建结构体积以及质量 越高,对土桩地基地震动特性的干扰也越高。



图 8 场地上塑造大坝对加速度反应谱的干扰 Fig.8 Interference of the dam to acceleration response spectrum



图 9 功地上型 這大坝 灯加速度 放大 倍数 的十执 Fig.9 Interference of the dam to acceleration amplification factor

#### 2.3 下卧基岩地形对场地地震动特性的影响

文章基于水平基岩圆形地下水泥土桩地基场地 模型,塑造"U"形河谷基岩地形土桩地基场地模型, 设置河谷底宽是 280 m,河谷两岸的坡度是 45°,如 图 10 所示,进而对河谷基岩地形场地横河向地震动 效应实施研究,水泥土桩地基的厚度是 140 m,土层 是粗砂层。



图 10 "U"形河谷中深厚土桩地基场地模型 Fig.10 Model of deep soil pile foundation site in U-shape valley

图中的"U"形河谷土桩地基模型中心竖直线上 和坡脚竖直线上不同高程结点振动相对加速度反应 图谱曲线的对比结果如图 11 所示。



图 11 基岩地形对加速度放大系数的干扰 Fig.11 Interference of bedrock terrain to acceleration amplification coefficient

分析图 11 能够看出:左侧坡脚线与左侧中心线 的横河向加速度响应程度趋势相同,"U"形河谷基 岩土桩地基中的横河向加速度响应程度在河谷核心 位置同水平基岩土桩地基在 0~60 m 高程内差距 较大,最大差距达到 0.5,而在 60~120 m 高程内多 次重叠,从河谷核心向两端,地表加速度响应程度不 断降低,主要是由河谷两岸基岩对土层横河向振动 的干扰形成的<sup>[13]</sup>。

#### 2.4 桩体模量对复合地基地震效应的干扰

本文采用深度、宽度分别是 10 m 和 50 m 的圆 形地下水泥土桩地基,在加固区的桩体模量是 200 MPa、360 MPa以及 500 MPa,对地基的地震效 应实施分析<sup>[14]</sup>。差异模量下地表位移峰值情况如 图 12 和图 13 所示,从中可得地表位移峰值在不同 土桩模量下不存在显著的规律。模量的提升可使得 加固区域地表加速度峰值降低。



Fig.12 Peak displacement of different points on the surface under different composite modulus



Fig.13 Change of peak acceleration at different points with composite modulus

#### 2.5 场地条件对复合地基地震效应的影响

分析相同加固方案下不同场地土层状态时,圆 形地下水泥土桩地基地震效应,采用加固 50 m 宽 和 10 m 深的圆形水泥土桩地基,对软弱下端土层 厚度实施调控,得到不同场地土层厚度情况如 表 4 所列。

图 15 以及图 16 内的软土层厚度是 0,用于描述没有实施加固的自由场。分析图 15 能够得出,通过相同加固方案受到不同土层条件的影响,地表位移具有较大的差异性。下端软弱土层厚度逐渐提升后,地表位移也不断提升,如果软土层厚度提升到一定程度后,地表位移会逐渐降低,该种现象是提升的软弱土层形成的隔震效应<sup>[15]</sup>。分析图 16 可知,软土层厚度处于加固区域状态下,加固区域地表加速

Table 4	Soil	thickness	at	different	sites	[].	۱
Table 4	SOIL	unickness	aı	unterent	sites	Unit; m	I

				- 1		
土层编号	简单描述	步骤1	步骤 2	步骤 3	步骤 4	步骤 5
1	素填土(流塑)	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7
2	淤泥质粉质黏土(流塑)	4.6	7.6	12.6	16.6	19.6
3	粉土与粉砂互层(稍密-松散)	2.5	0	0	0	0
4	粉质黏土(夹粉砂、稍密)	4.8	3.4	0	0	0
5	粉质黏土(夹粉砂、稍密)	5	5	4	0	0
6	粉细砂(局部夹粉土、稍一中密)	14.3	14.3	14.3	15	11
7	粉细砂(局部夹粉土、中密)	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2
8	粉细砂(局部夹粉土、中-密实)	1	1	1	1	1
9	粉细砂夹砾砂(中-密实)	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1



图 14 加固中心地表加速度峰值随复合模量的 波动情况

Fig.14 Change of peak acceleration at reinforcement area center with composite modulus



#### 厚度的波动



度峰值同土层厚度间具有正相关性,软土层厚度比 加固深度高,则加固区地表加速度峰值逐渐降低,该 种问题的形成是因为地震发生过程中,加固范围下 端软土层得到了隔震的效应。如果软土层厚度超过 设置的发展,隔震效果将保持不变。在相应的土层 厚度区域中,加固范围外端地表加速度峰值比自由 场高。



图 16 地表不同点加速度峰值随软弱下端层 厚度的波动

Fig.16 Change of peak acceleration at different points with thickness of the soft soil

#### 3 结论

综上所述可得出以下结论。

(1)圆形地下水泥土桩复合地基模量比原状土高,地震时加固范围地表的峰值加速度响应降低,提高抗震性;

(2) 地震发生时,圆形地下水泥土桩地基地表的峰值加速度的地震反应同土桩加固深度间具有负相关性,加固深度比10 m 高时,加固深度对地基地 表加速度反应的干扰性不断降低;架构深度比设置 的阈值高时,加固范围外端的地表加速度的地震反 应强度比自由场高。

(3)圆形地下水泥土桩地基上新建结构对坝基 周围场地地震动特性形成较强的干扰性,干扰幅度 以及区域同新建结构规模具有较高的关联性;

(4) 水泥土桩地基下端基岩表面地形,同其上 部地基场地地震动特性间具有一定的关联性,"U" 形河谷土桩地基场地各位置一致的土柱地震反应具 有显著的差异。

(5) 圆形地下水泥土桩地基加固范围的地表加

速度峰值,在土桩模量的提升下出现微小的降低趋势。然而在水泥土桩动剪切模量的波动趋势中,该种对加速度峰值的波动影响较低,可不予考虑。

#### 参考文献(References)

- [1] 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 Me-
- chanics,2016,37(3):672-678.
  [2] 喻豪俊,彭社琴,赵其华,等.我国西南山区输电线路场地地震效应[J].电力建设,2015,36(6):40-45.
  YU Haojun,PENG Sheqin,ZHAO Qihua, et al. Seismic Effect on Site Condition of Temperature Line in Southwest Mountainen Anne State Condition of Temperature Line in Southwest Mountainen Anne State Condition of Temperature Line in Southwest Mountainen Anne State Condition of Temperature Line in Southwest Mountainen Anne State Condition of Temperature Anne State Condition of Temperat

Site Condition of Transmission Line in Southwest Mountainous Area[J].Electric Power Construction,2015,36(6):40-45.

- [3] 侯春林,李小军,潘蓉,等.地震动持时对核岛结构设计地基场 地非线性地震响应影响分析[J].工业建筑,2016,46(10):9-12.
   HOU Chunlin,LI Xiaojun,PAN Rong,et al.Influence Analysis of Ground Motion Duration on Nonlinear Seismic Response of Nuclear Island Design Foundation[J].Industrial Construction, 2016,46(10):9-12.
- [4] 冯君,孟少伟,桩间土为非饱和土的刚性桩复合地基复合模量 计算[J].铁道科学与工程学报,2017,14(4):762-768.
  FENG Jun, MENG Shaowei. Composite Modulus Calculation for Rigid Pile Composite Foundation with the Unsaturated Soil between Piles[J].Journal of Railway Science and Engineering, 2017,14(4):762-768.
- [5] 陈令坤,张楠,夏禾.方向脉冲及竖向效应对高铁桥梁地震响应 影响[J].振动工程学报,2016,29(4):704-713.
   CHEN Lingkun,ZHANG Nan,XIA He.Effects of Directivity Pulse and Vertical Earthquake on Seismic Response of High-Speed Railway Bridge[J].Journal of Vibration Engineering, 2016,29(4):704-713.
- [6] 王正,王韵璐,曹瑜,等.混凝土变形模量和泊松比的动态测试 研究[J].工业建筑,2017,47(1):84-88.
   WANG Zheng, WANG Yunlu, CAO Yu, et al. Dynamic Test Study of Deformation Modulus and Poisson Ratio of Concrete [J].Industrial Construction,2017,47(1):84-88.
- [7] DERAKHSHAN H,GRIFFITH M C,INGHAM J M. Out-ofplane Seismic Response of Vertically Spanning URM Walls Connected to Flexible Diaphragms[J].Earthquake Engineering & Structural Dynamics,2016,45(4):563-580.
- [8] 梁建文,齐晓原,巴振宁,基于黏弹性边界的三维凹陷地形地震 响应分析[J].地震工程与工程振动,2014,01(4):21-28.
   LIANG Jianwen,QI Xiaoyuan,BA Zhenning.Seismic Response Analysis of 3D Canyon Based on the Viscous-Spring Boundary

[J].Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2014, 01(4):21-28.

[9] 于旭,庄海洋,陈国兴,等.软弱地基上隔震结构地震反应及隔 震效果的预测方法研究[J].振动工程学报,2017,30(5):817-826.

YU Xu,ZHUANG Haiyang,CHEN Guoxing, et al. Prediction Method Research of Seismic Response and Seismic Isolation Effect of Isolated Structure on Soft Soil Foundation[J].Journal of Vibration Engineering,2017,30(5):817-826.

- [10] 张忠利,齐文浩,袁媛,等.广西覆盖型岩溶区 II 类场地地震效应分析[J].震灾防御技术,2015,10(3):512-521.
  ZHANG Zhongli, QI Wenhao, YUAN Yuan, et al. Seismic Effect of Type II Site in Overlaying Karst Area of Guangxi [J].Technology for Earthquake Disaster Prevention,2015,10 (3):512-521.
- [11] 陈国兴,金丹丹,朱姣,等.河口盆地非线性地震效应及设计地震动参数[J].岩土力学,2015,36(6):1721-1736.
  CHEN Guoxing,JIN Dandan,ZHU Jiao,et al.Nonlinear Seismic Response of Estuarine Basin and Design Parameters of Ground Motion[J].Rock and Soil Mechanics,2015,36(6): 1721-1736.
- [12] 袁照威,陈龙,高世臣,等.基于马尔科夫-贝叶斯模拟算法的 多地震属性沉积相建模方法——以苏里格气田苏 10 区块为 例[J].油气地质与采收率,2017,24(3):37-43.

YUAN Zhaowei, CHEN Long, GAO Shichen, et al. A Method of Sedimentary Facies Modeling Through Integration of Multi-seismic Attributes Based on Markov-Bayes Model: An Example From Su10 Area in the North of Sulige Gas Field [J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2017, 24(3): 37-43.

- [13] 苏栋,高翔,明海燕,等.液化对砂土场地地表加速度响应的影响[J].防灾减灾工程学报,2016,36(1):69-74.
  SU Dong,GAO Xiang, MING Haiyan, et al. Effect of Lique-faction on Ground Surface Acceleration Response of Sand Site
  [J].Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering,2016,36(1):69-74.
- [14] 王曙光,何光槐,汤祖平,等.考虑竖向地震效应的边坡地震永 久位移计算图表[J].铁道科学与工程学报,2016,13(1):55-62.

WANG Shuguang, HE Guanghuai, TANG Zuping, et al. Design Tables of Seismic Permanent Displacement for Soil Slope Considering the Vertical Earthquake Effect [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2016, 13(1):55-62.

[15] 谢云飞,刘阳,何文福.考虑碰撞效应的土-单层隔震结构的损伤性能分析[J].四川建筑科学研究,2017,43(2):88-93.
 XIE Yunfei,LIU Yang,HE Wenfu,Damage Performance Analysis of Soil-single-story Isolated Structure System Considering Impact [J].Sichuan Building Science,2017,43(2):88-93.