

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20211028001

# 螺旋锚复合基础对村镇生土建筑抗震性能影响研究\*

侯世伟<sup>1</sup>, 高广亮<sup>1</sup>, 张皓<sup>1</sup>, 孟素云<sup>1</sup>, 曲金红<sup>2</sup>

(1. 沈阳建筑大学土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 中国能源建设集团辽宁电力勘测设计院有限公司, 辽宁 沈阳 110079)

**摘要:** 村镇生土结构因其抗震能力不足在遭遇地震时产生破坏严重, 而螺旋锚基础能提供抗拔力来防止建筑物的隆起和倾覆。针对砂土中螺旋锚锚盘埋深、间距及数量对上拔承载特性及极限上拔承载力影响因素进行数值模拟研究, 通过对比优化确定螺旋锚复合基础参数。并以中国村镇典型单层生土结构为研究对象, 对条形基础生土结构和螺旋锚复合基础生土结构进行地震反应分析, 以此来研究适合村镇生土结构的抗震构造加固措施。基于非线性动力时程分析方法, 提取结构顶层位移, 研究螺旋锚复合基础对生土结构地震反应的影响。结果表明: ①埋深比为 10.5, 锚盘间距为 4.5D 时的双片螺旋锚上拔承载特性最好; ②在地震动作用下, 螺旋锚复合基础形式在一定程度上影响结构的整体抗震性能, 螺旋锚复合基础使生土建筑的抗震性能显著提升; ③螺旋锚复合基础在地震动作用下的轴力最大值未达到其极限上拔承载力, 基础坚实可靠; ④地震动作用下, 螺旋锚复合基础降低了生土结构的破坏等级, 提高了结构的性能水平。

**关键词:** 螺旋锚; 生土结构; 抗震性能; 轴力分析; 破坏状态

**中图分类号:** TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2023)04-0778-09

## Influence of Screw Anchor Composite Foundation on Seismic Performance of Rural Raw Earth Buildings

HOU Shiwei<sup>1</sup>, GAO Guangliang<sup>1</sup>, ZHANG Hao<sup>1</sup>, MENG Suyun<sup>1</sup>, QU Jinhong<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China;

2. China Energy Engineering Group Liaoning Electric Power Survey & Design Institute Co. LTD, Shenyang 110079, China)

**Abstract:** The soil structure of towns is seriously damaged in earthquakes because of its insufficient seismic capacity, and the screw anchor foundation can provide anti-pullout force to prevent the building from uplifting and overturning. According to the influence factors of the buried depth, spacing and screw anchor plates number on the uplift bearing characteristics and ultimate uplift bearing capacity of the screw anchor in sand, the parameters of the screw anchor composite foundation are determined by comparison and optimization. Taking the typical single-layer raw earth structure in Chinese villages and towns as the research object, the seismic response of the strip foundation raw earth structure and the screw anchor composite foundation raw earth structure are analyzed, so as to study the seismic structural reinforcement measures suitable for rural raw earth structure. Based on the nonlinear dynamic time history analysis method, the top displacement of the structure is extracted, and the influence of

\* 收稿日期: 2021-10-28; 修回日期: 2022-01-18

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFD1100404)、辽宁省教育厅项目(LJKZ0564)、辽宁省科技厅博士启动基金(2020-BS-161)资助

作者简介: 侯世伟(1982—), 女, 副教授, 硕导, 博士。主要从事土体渐进破坏模拟研究。E-mail: hsw1375@126.com

screw anchor composite foundation on the seismic response of raw earth structure is studied. The results show that: (1) When the buried depth ratio is 10.5 and the distance between anchor plates is 4.5D, the uplift bearing characteristics of double screw anchors are the best; (2) Under the action of ground motion, the form of the screw anchor composite foundation affects the overall seismic performance of the structure to a certain extent. The screw anchor composite foundation significantly improves the seismic performance of raw earth buildings; (3) The maximum axial force of screw anchor composite foundation under the ground motion does not reach its ultimate uplift bearing capacity, and the foundation is solid and reliable; (4) Under earthquake action, the damage grade of raw earth structure is reduced and the performance level of structure is improved.

**Keywords:** screw anchor; raw soil structure; seismic performance; axial force analysis; failure state

## 0 引言

我国农村人口众多,生土结构房屋在农村居住形式中占有相当大的比例。地震在自然灾害当中属于破坏性最大的一种,对村民的生命财产安全造成了威胁<sup>[1-2]</sup>。以往地震后的宏观调查表明,生土建筑的震害一般都很严重,但也存在着一些生土建筑,在经过数百年的侵蚀和震害后仍然完好无损,这说明只要结构措施合理,生土建筑也能满足抗震要求。螺旋锚基础是一种可以提供抗拔力,防止建筑物隆起和倾覆的独特基础形式,被广泛应用于土木工程的各个领域。

国内外学者对螺旋锚进行了大量的研究,陈榕等<sup>[3]</sup>通过模型试验和有限单元法分析了密砂中圆形锚板上拔承载力的尺寸效应问题。王杰等<sup>[4]</sup>进行了砂土中螺旋锚的抗拔模型试验,研究了不同埋深率下,锚盘间距是否对上拔承载特性产生影响。G.G. Meyerhof和J.I.Adams<sup>[5]</sup>考虑土体破坏面等效因素,提出了锚盘抗拔承载力的经验公式。R.S.Merifield<sup>[6]</sup>进行了多节螺旋锚的抗拔试验,分析了不同锚盘间距情况下承载力的变化情况,利用数值模拟与室内试验进行对比。

生土建筑一直是众多学者关注的热点,研究人员开展了大量的试验研究。刘成清等<sup>[7]</sup>利用有限单元法,对四个典型生土建筑进行在不同地震波作用下的弹塑性时程分析,研究了其抗震性能,提出了改善生土建筑抗震性能的方法和措施。葛学礼等<sup>[8]</sup>提出多种加固方法,在对生土建筑模型的研究中发现这些加固方法提高了建筑的抗震能力。N. Tarque等<sup>[9]</sup>评估了库斯科(秘鲁)土坯房屋的地震风险性,对建筑的结构承载能力进行了预测。J. Pra-

bakar和R.S.Sridhar<sup>[10]</sup>对加筋土技术进行了研究,在该研究中,剑麻纤维被选定作为加筋材料,对这些加筋土试样进行单轴和三轴受压试验,试验结果表明剑麻可以作为一种较好的加筋土材料。

本文针对砂土中螺旋锚锚盘埋深、间距及数量对上拔承载特性及极限上拔承载力影响进行数值模拟,通过数据对比确定螺旋锚复合基础的锚盘数量、埋深及间距。并以中国村镇典型单层生土结构为研究对象,对无基础生土结构、条形基础生土结构和螺旋锚复合基础生土结构进行了地震反应分析,以此来研究适合村镇生土结构的抗震构造加固措施。

## 1 基础的选择和有限元模型建立

### 1.1 条形基础参数确定

生土墙的条形基础形式主要有:卵石基础、砖基础和夯土基础等<sup>[11]</sup>。基础的深度一般是根据房屋的高度和地基的土质状况来决定,一般房屋基础埋深约300~800 mm,宽度根据基础材料的不同而各不相同,但基槽宽度宜大于墙厚100~200 mm。本研究选取的条形基础为夯土基础,宽度取600 mm,埋深取700 mm。

### 1.2 螺旋锚基础参数确定

为研究螺旋锚锚盘埋深、间距及锚盘数对上拔承载特性的影响,设计不同埋深比、间距和数量的多锚片螺旋锚<sup>[12]</sup>,试验方案见表1。为保证强度和刚度要求,螺旋锚由钢材加工而成,锚片厚为10 mm,直径D为340 mm,螺距为120 mm,锚杆直径d为140 mm,计算域以土体分析区域向下扩展1倍的桩体直径,横截面直径取10倍的桩体直径,土

体长度为2倍的桩长。土体下表面采用完全固结约束,侧面约束 $x$ 、 $z$ 方向的位移和绕 $y$ 轴上的旋转,荷载采用位移加载方式,施加在螺旋锚顶面的参考点上。在对锚体和土体进行网格划分时,均采用C3D8R实体单元<sup>[13]</sup>,表2为材料主要参数。

表1 试验方案  
Table 1 Test programs

编号	影响因素	埋深比	锚盘数	锚盘间距
1		4.5		
2		6.0		
3	埋深比	7.5	1	0
4		9.0		
5		10.5		
6	锚盘间距	9.0、10.5		1.5D
7		7.5、10.5		3.0D
8	锚盘数	6.0、10.5	2	4.5D
9		4.5、10.5		6.0D

表2 材料的主要参数

Table 2 Main parameters of materials

类型	密度/ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	弹性 模量/ MPa	泊 松 比	粘聚力/ kPa	内摩擦 角/( $^{\circ}$ )	剪胀角/ ( $^{\circ}$ )
螺旋锚	7 800	$2.06 \times 10^5$	0.3	—	—	—
砂土	1 900	10	0.3	5	25	3

为研究螺旋锚锚盘埋置深度对其上拔承载力的影响,建立埋深比分别为 $H/D=4.5、6、7.5、9、10.5$ 的单片螺旋锚模型,埋深比为锚盘埋深 $H$ 与直径 $D$ 之比,图1为不同埋深比下,上拔荷载—位移关系曲线。可以看出,在初期时荷载增长幅度较大,随着位移的增大,荷载增量逐渐变小。若以上拔力最大值进行比较, $H/D=4.5、6、7.5、9$ 和 $10.5$ 时上拔力最大值分别为 $9.3、16.9、24.6、31.9、33.0$  kN,上拔力与上一级埋深比时的荷载值相比分别提高了 $81.7\%、45.6\%、29.7\%、3.4\%$ 。对上拔力进行无量纲化处理,上拔力系数 $K_r = Q/\gamma AH$ , $\gamma$ 为土体重量, $A$ 为锚盘面积, $Q$ 为上拔力, $H$ 为埋置深度,绘制不同埋深比与上拔力系数的关系曲线,如图2所示, $H/D \leq 9$ 时,上拔力系数逐渐增加;当 $H/D > 9$ 时,稍有下降。分析可知,上拔力随埋深比的增大而增大,当埋深比 $H/D > 9$ 时,上拔力系数减小,增大程度随之减弱。因此,当满足埋深比 $H/D > 9$ ,可使螺旋锚发挥最大的上拔承载特性。

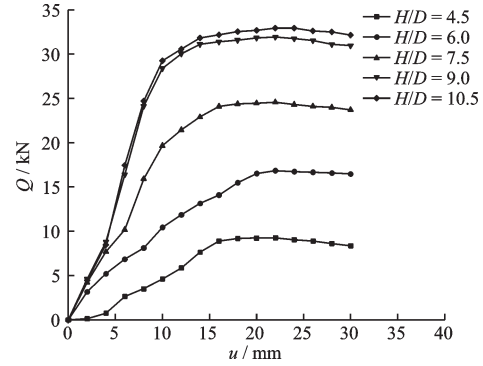


图1 不同埋深比的 $Q-u$ 曲线

Fig.1  $Q-u$  curves for different buried depth ratios

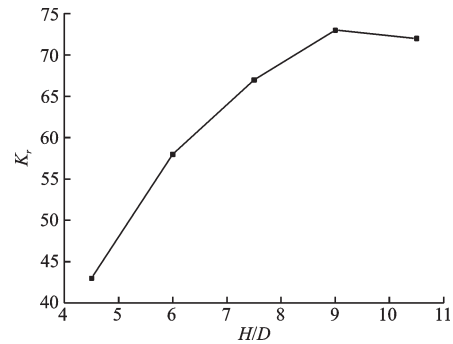


图2 埋深比与上拔力系数曲线

Fig.2 Curve of buried depth ratio and uplift force coefficient

为研究锚盘间距对上拔极限承载力的影响,对不同锚盘间距的等直径双盘螺旋锚进行数值模拟,保持埋深比不变,改变锚盘的间距。在下面的分析计算中,埋深比 $H/D$ 固定为 $10.5$ ,使锚盘间距 $S$ 与锚盘直径 $D$ 之比分别是 $1.5、3、4.5、6$ ,螺旋锚上拔力发挥效率定义为多锚盘螺旋锚的上拔力与每个单锚的上拔力之和的比值:

$$\eta = \frac{Q_{MU}}{\sum Q_{IU}} \quad (1)$$

式中, $\eta$ 为上拔力发挥效率; $Q_{MN}$ 为多锚盘螺旋锚上拔力; $Q_{IN}$ 为单锚上拔力。

不同锚盘间距的螺旋锚上拔位移—荷载曲线如图3所示。图3中各工况的上拔荷载—位移曲线特征基本一致。当上拔位移 $u < 15$  mm时,上拔力随着位移的增大而增大。上拔位移超过 $22$  mm时,曲线趋于水平。因此,将上拔位移为 $22$  mm对应的上拔力作为极限上拔力,并由式(1)计算双盘锚发挥效率 $\eta$ ,计算结果见表3,螺旋锚的发挥效率随着锚盘间距比的增大而增大。当 $S=1.5D$ 时,两锚盘有较大的影响,上拔力发挥效率为 $53\%$ ;  $S=3.0D$ 时,上拔力发挥效率达到 $76.4\%$ ;  $S=4.5D$ 时,上拔

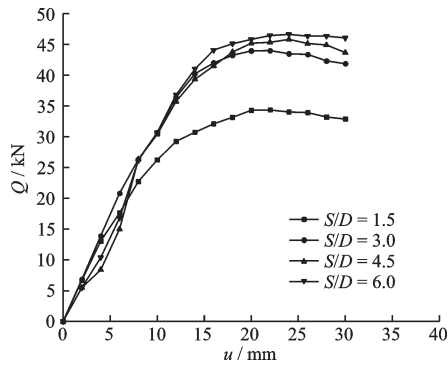


图3 不同间距比的  $Q-u$  曲线  
Fig.3  $Q-u$  curves for different spacing ratios

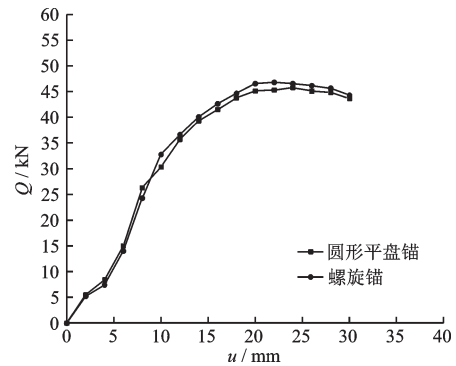


图4 不同锚盘型式的  $Q-u$  曲线  
Fig.4  $Q-u$  curves for different anchor plate types

表3 单盘及双盘螺旋锚上拔承载力及效率

Table 3 Uplift bearing capacity and efficiency of single-disc and double-disc screw anchors

$n$ /锚盘个数	$S/D$	$H/D$	$Q_u/kN$	$\eta/\%$
1	0	4.5	9.3	—
1	0	6.0	16.9	—
1	0	7.5	24.6	—
1	0	9.0	31.9	—
1	0	10.5	33.0	—
2	1.5	9.0、10.5	34.4	53%
2	3.0	7.5、10.5	44.0	76.4%
2	4.5	6.0、10.5	45.8	91.8%
2	6.0	4.5、10.5	39.6	93.6%

力发挥效率达到91.8%; $S=6.0D$ 时,上拔力发挥效率达到93.6%,此时接近单独破坏形式。但考虑到实际应用,锚盘间距 $S=4.5D$ 的螺旋锚相对于 $S=6D$ 的螺旋锚,能更好的将锚盘设置在持力性较好的同一种土层中,并且 $S=4.5D$ 的螺旋锚和 $S=6D$ 的上拔力发挥效率基本相似,故锚盘间距取 $4.5D$ 。

由于在生土结构地震反应分析中,螺旋锚不易收敛,计算过程较为复杂,因此用圆形平盘锚代替螺旋锚。为比较锚盘型式对上拔承载力的影响,在锚盘埋深比、间距和直径相同的条件下,对平盘锚和螺旋锚进行上拔数值模拟试验,所得荷载一位移关系曲线如图4所示。由图4可见,相同条件下的平盘锚和螺旋锚的荷载一位移关系曲线基本相同,承载力最大值分别为45.8、46.2 kN,与螺旋锚相比,平盘锚的承载力最大值减少0.87%,即极限承载力和对应破坏位移没有明显差别<sup>[14]</sup>。因此螺旋锚复合基础生土结构房屋在地震反应分析中的锚型采用平盘锚,螺旋锚基础锚型如图5所示。



图5 螺旋锚基础锚型示意  
Fig.5 Anchor-type diagram of screw anchor foundation

### 1.3 生土结构房屋有限元模型的建立

#### 1.3.1 夯土农房布置方案

通过查阅资料及相关规范、阅读文献及项目调研,最终确定了村镇生土结构农房的各项参数<sup>[15]</sup>,多数结构抗震研究未考虑基础及地基的影响,为了对比分析,对无基础生土结构房屋(Groundless soil structure house, GSSH)、条形基础生土结构房屋(Strip foundation raw soil structure house, SFRSSH)、螺旋锚复合基础生土结构房屋(Spiral anchor composite foundation raw soil structure house, SACFRSSH)进行对比模拟,研究螺旋锚复合基础对生土建筑抗震性能的影响。

本次数值模拟建模方案采用夯土农舍的三槽对称布置<sup>[15]</sup>。开间轴线尺寸为 $4.5\text{ m} \times 6\text{ m}$ ,总尺寸为 $13.9\text{ m} \times 6.4\text{ m}$ ,土横墙高为 $4.28\text{ m}$ ,纵墙高 $3\text{ m}$ ,开窗,后墙高 $3\text{ m}$ 无窗,屋顶为对称双坡彩钢屋顶,采用在夯土横墙承重。该模型墙体厚为 $0.4\text{ m}$ ,正立面的左右卧室都开有方形窗户,窗台高度为 $0.9\text{ m}$ ,窗口大小为 $1.2\text{ m} \times 1.2\text{ m}$ ,中间的人口门厅

尺寸是1.5 m×2.1 m,两间卧室与门厅之间有相连的门,大小为1.2 m×2.1 m。主要尺寸如图6所示。

本文基于地震作用下结构整体变形等宏观反应研究,采用整体式建模方法对生土结构进行有限元模型建模,夯土房屋建模如图7所示。

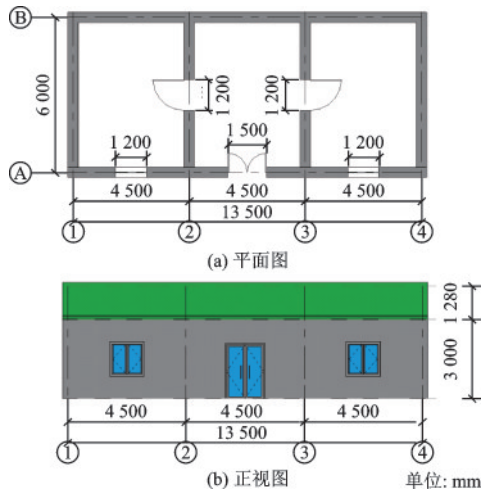


图6 夯土农房布置尺寸示意  
Fig.6 Layout of rammed earth farmhouse

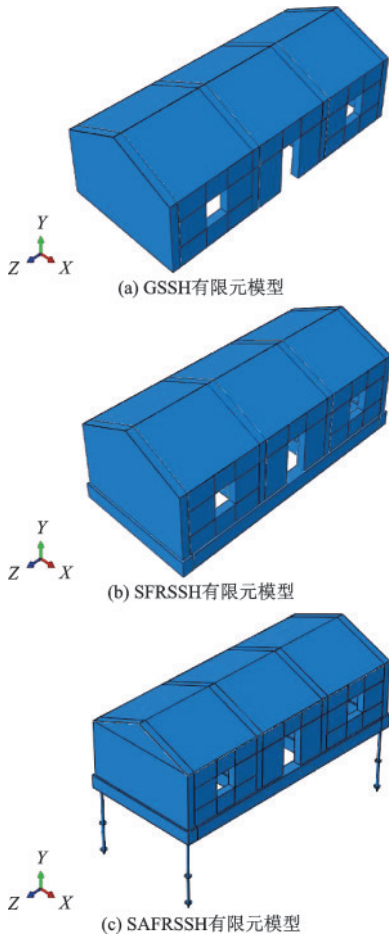


图7 夯土农房有限元模型  
Fig.7 Finite element model of rammed earth house

### 1.3.2 构件材料的建模单元分析

本文研究夯土墙体的破坏形态和受力机理,为无基础生土结构(GSSH)、条形基础生土结构(SFRSSH)和螺旋锚复合基础生土结构(SACFRSSH)有限元模型选择适合的单元和本构关系。作为主要构件的夯土墙,假定其是符合实际的均匀、连续、各向同性的实体。在数值模拟分析过程中将夯土墙体定义为实体单元体。

### 1.3.3 边界条件的定义

将夯土墙体的基础部分设置边界约束,其余墙体接触部分、屋顶与墙体上端均设置TIE约束。结合实际情况,在有限元分析中选用夯土墙体的下表面与地基设置TIE约束。对于地震反应而言,由于地基相对于生土结构是无限域,为了能够模拟“地基辐射阻尼”效应,在有限范围地基的前提下,采用粘弹性人工边界来模拟无限地基对近场波动的影响<sup>[16-17]</sup>,图8是模拟采用的三维粘弹性边界示意图。

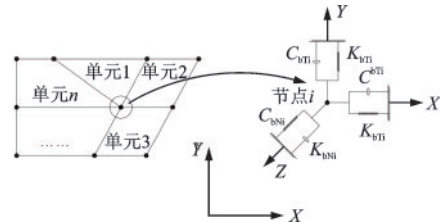


图8 三维粘弹性边界示意  
Fig.8 Schematic diagram of three-dimensional viscoelastic boundary

### 1.3.4 材料的本构模型

生土墙选取素夯土,密度取1 950 kg/m<sup>3</sup>,泊松比取0.35,弹性模量取613 MPa,黏聚力取294.6 kPa,内摩擦角取44.77°。彩钢屋顶主要参数:密度取10 kg/m<sup>3</sup>,泊松比取0.25,弹性模量2—E8 MPa。

## 2 地震反应分析

### 2.1 模态分析

模态分析是研究结构动力特性的方法之一,模态是结构的固有振动特性,每一个模态都有特定的固有频率、阻尼比和模态振型,这都是结构承受动荷载,以及地震荷载时的重要特征参数。夯土房屋的动力特性对其在地震作用下的结构响应有着直接的影响,故知其自振频率、周期与振型便可了解其基本的动力学特性。为得到生土结构房屋的

主振型自振频率,本模拟运用ABAQUS的模式分析对三种工况进行模态分析,分析结果见表4。

表4 三种生土结构房屋主振型频率

Table 4 Main vibration frequencies of three kinds of raw earth structure buildings

模型	GSSH	SFRSSH	SACFRSSH
一阶振型	8.710	9.525	9.800
二阶振型	9.487	10.462	10.446
三阶振型	9.827	10.484	10.620

通过模态分析可以看出,虽然三种工况在本质上只是基础形式不同,但通过对比三个模型主振型可以发现SACFRSSH的频率要比GSSH高1.08~1.13倍,且GSSH的周期明显比SACFRSSH大,说明螺旋锚复合基础的设置一定程度上增加了结构的整体刚度。

## 2.2 地震波的选取与输入

本研究选取的场地类别为二类场地,根据建筑抗震设计规范<sup>[18]</sup>可知,抗震设防烈度为8、设计基本地震加速度值为0.3g,所属的设计地震分组为第二组。从美国太平洋地震工程研究中心(PEER)数据库中选取3条合理的真实地震动对结构进行动力时程分析,具体信息如表5所示,并将所选地震波进行调幅处理,使每条地震波的PGA分别为0.2g、0.4g、0.6g。

表5 地震动信息

Table 5 Earthquake information

名称	PGA/ g	震级	震中距/ km	台站
A-CAS-000	0.332	5.8	16.9	Compton-CastlegateSt.
A-BIR-180	0.299	6	56.8	Downey-Birthdale
C08-320	0.259	6.1	5.3	Cholame #8

本文通过在人工边界节点上施加等效荷载的方式来实现地震波动输入的方法<sup>[16-17]</sup>,即将地震波动的位移和速度时程转换为等效节点荷载施加于人工边界上完成地震动的输入。地基的波场包括已知的人射自由场和由基础上附加结构反射形成的散射场。在截断边界处,附加结构反射形成的散射场已被人工边界吸收掉,因此在人工边界处仅考虑自由场输入问题,图9为粘弹性人工边界自由场输入模型示意图。

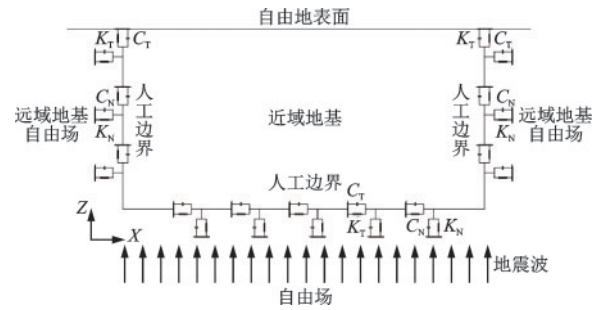


图9 粘弹性人工自由场输入示意

Fig.9 Schematic diagram of viscoelastic artificial free field input

## 2.3 地震作用下生土结构地震反应分析

基于动力时程分析方法,将选取的地震波分别输入到GSSH、SFRSSH和SAFRSSH中进行非线性地震反应分析。表6列出了三条地震动的不同加速度作用下GSSH、SFRSSH和SACFRSSH的顶层位移最大值。

表6 地震作用下生土结构顶层位移最大值对比

Table 6 Comparison of the maximum displacement of the top layer of raw earth structure under earthquakes

序号	名称	PGA/ g	顶层位移/mm		
			GSSH	SFRSSH	SACFRSSH
1		0.2	3.34	2.68	0.80
2	A-CAS-000	0.4	6.82	5.47	1.72
3		0.6	10.29	8.27	2.65
4		0.2	2.39	2.26	0.75
5	A-BIR-180	0.4	4.65	4.40	1.35
6		0.6	6.97	6.55	2.09
7		0.2	2.35	1.91	0.90
8	C08-320	0.4	4.57	3.75	1.68
9		0.6	6.78	5.57	2.46

图10给出了在PGA=0.4g时,GSSH、SFRSSH和SAFRSSH三种基础结构在A-CAS-000、A-BIR-180和C08-320地震动作用下顶层位移时程曲线对比情况。从表6可以看出,结构GSSH、SFRSSH和SAFRSSH遭受地震作用后位移响应均明显。

在A-CAS-000地震动作用下,PGA为0.2g时,与GSSH工况相比SFRSSH和SAFRSSH的顶层位移分别减少了0.66 mm和2.54 mm,减幅分别为19.8%和76%;PGA为0.4g时,与GSSH工况相比

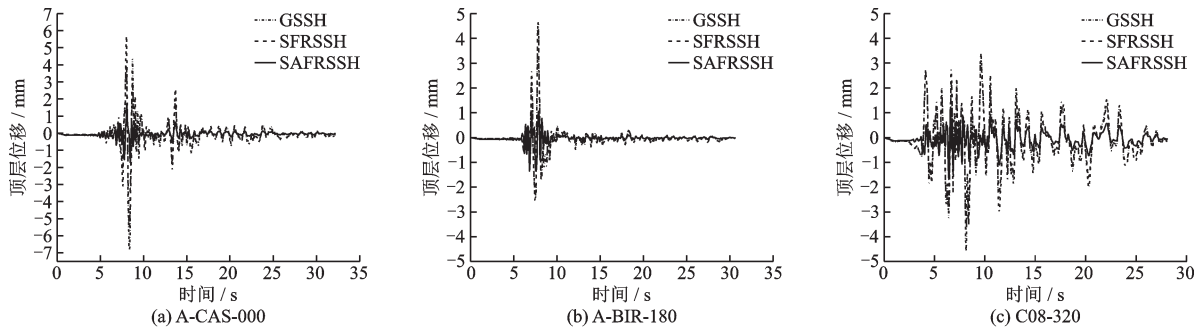


图10  $PGA=0.4g$ 时GSSH、SFRSSH和SAFRSSH在不同地震作用下顶层位移时程曲线对比  
Fig.10 Comparison of top displacement time history curves of GSSH, SFRSSH and SAFRSSH with a  $PGA$  of 0.4

SFRSSH和SAFRSSH的顶层位移分别减少了1.35 mm和5.10 mm,减幅分别为19.8%和74.8%; $PGA$ 为0.6g时,与GSSH工况相比SFRSSH和SAFRSSH的顶层位移分别减少了2.02 mm和7.64 mm,减幅分别为19.6%和74.2%。

在A-BIR-180地震动作用下, $PGA$ 为0.2g时,与GSSH工况相比SFRSSH和SAFRSSH的顶层位移分别减少了0.13 mm和1.64 mm,减幅分别为5.4%和68.6%; $PGA$ 为0.4g时,与GSSH工况相比SFRSSH和SAFRSSH的顶层位移分别减少了0.25 mm和3.30 mm,减幅分别为5.4%和71.0%; $PGA$ 为0.6g时,与GSSH工况相比SFRSSH和SAFRSSH的顶层位移分别减少了0.42 mm和4.88 mm,减幅分别为6.0%和70.0%。

在C08-320地震动作用下, $PGA$ 为0.2g时,与GSSH工况相比SFRSSH和SAFRSSH的顶层位移分别减少了0.44 mm和1.45 mm,减幅分别为18.7%和61.7%; $PGA$ 为0.4g时,与GSSH工况相比SFRSSH和SAFRSSH的顶层位移分别减少了0.82 mm和2.89 mm,减幅分别为17.9%和63.2%; $PGA$ 为0.6g时,与GSSH工况相比SFRSSH和SAFRSSH的顶层位移分别减少了1.21 mm和4.32 mm,减幅分别为17.8%和63.7%。

三种工况在这9组地震作用下顶层位移的大小不同,分析数据可知,随着 $PGA$ 的增大,顶层位移最大值呈现明显的增长趋势。说明地震 $PGA$ 大小为影响生土结构建筑顶层位移的主要因素之一,螺旋锚复合基础生土结构在地震作用下的顶层位移明显减小。

#### 2.4 地震动作用下螺旋锚复合基础轴力分析

为了便于分析螺旋锚基础的承载情况,经绘制

桩身轴力分布图后发现,四根螺旋锚基础之间的桩身轴力基本一致,以地震动A-CAS-000为例,图11为螺旋锚复合基础生土结构在地震动A-CAS-000的不同 $PGA$ 作用下,前10 s的Z方向轴力时程曲线。分析可知, $PGA$ 为0.2g时,轴力最大值为32.0 kN, $PGA$ 为0.4g时,轴力最大值为35.3 kN, $PGA$ 为0.6g时,轴力最大值为38.4 kN。由螺旋锚上拔模拟实验可知,埋深比为10.5、锚盘间距为4.5D时的双片螺旋锚的极限上拔承载力为45.8 kN,因此在地震动作用下螺旋锚基础的上拔承载力未达到其极限值,基础未破坏。

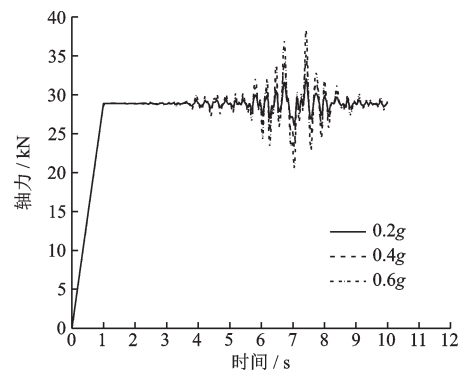


图11 不同 $PGA$ 地震动作用下螺旋锚基础轴力时程曲线  
Fig.11 Time history curve of axial force of screw anchor foundation under ground motions with different  $PGAs$

#### 2.5 地震动作用下生土结构破坏状态分析

我国将建筑物破坏等级划分基本标准分为五个等级<sup>[19]</sup>,按照不同性能指标水平的要求及限值分别是Ⅰ级:基本完好;Ⅱ级:轻微破坏;Ⅲ级:中等破坏;Ⅳ级:严重破坏;Ⅴ级:倒塌。根据破坏状态的划分等级,相应的极限状态如下:抗震性能水平分为正常使用、立即使用、生命安全、防止倒塌四个性

能指标水平。

本文中所规定的四个基于性能的极限状态如下:LS1(正常使用极限状态),LS2(立即使用极限状态),LS3(生命安全极限状态),LS4(防止倒塌极限状态)。四种极限状态间需要合理的物理量来进行衡量,根据合理指标来对应不同极限状态界限值。本文根据结构构件的反应选取的性能指标为层间最大位移角,生土结构在震动作用下的层间最大位移角见表7。

表7 地震作用下生土结构层间最大位移角

Table7 Maximum inter-story drift angle of raw earth structure under earthquake

序号	名称	PGA/ g	层间位移角/ $10^{-3}$		
			GSSH	SFRSSH	SACFRSSH
1		0.2	1.113	0.893	0.267
2	A-CAS-000	0.4	2.273	1.823	0.573
3		0.6	3.43	2.757	0.883
4		0.2	0.797	0.753	0.25
5	A-BIR-180	0.4	1.55	1.467	0.45
6		0.6	2.323	2.185	0.697
7		0.2	0.783	0.637	0.3
8	C08-320	0.4	1.523	1.25	0.56
9		0.6	2.26	1.857	0.82

对于以层间位移角为参考性能指标,依据建筑抗震设计规范<sup>[18]</sup>及相关文献[20]的参考,本文中所取的4种极限状态及相应的层间位移角限值见表8。

表8 按结构层间最大位移角进行震害等级划分

Table 8 Classification of seismic damage grade according to the maximum inter-story drift angle

震害等级	基本完好	轻微破坏	中等破坏	严重破坏	倒塌
层间位移角指标	<1/1330	1/1330~1/800	1/800~1/500	1/500~1/330	>1/330

图12为生土结构三种工况在震动作用下,层间最大位移角在四种极限状态的分布情况,在三条地震动作用下,PGA为0.2g时,GSSH工况的破坏状态均为轻微破坏,SFRSSH工况的破坏状态分别为轻微破坏和基本完好,SAFRSSH工况的破坏状态为基本完好;PGA为0.4g时,GSSH工况的破坏状态分别为中等破坏和严重破坏,SFRSSH工况的破坏状态为中等破坏,SAFRSSH工况的破坏状态

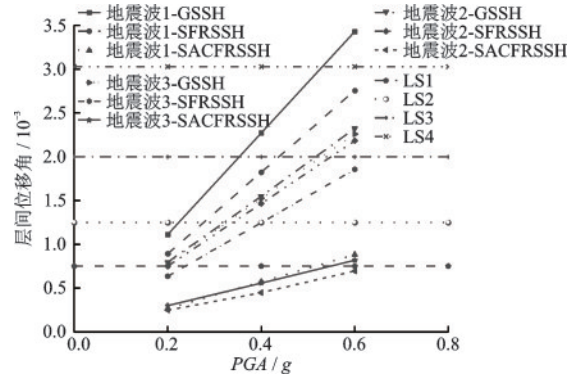


图12 地震动作用下生土结构层间最大位移角在四种极限状态的分布情况

Fig.12 Distribution of maximum inter-story drift angle of raw earth structure under seismic action in four limit states

为基本完好;PGA为0.6g时,GSSH工况的破坏状态分别为严重破坏和倒塌,SFRSSH工况的破坏状态分别为严重破坏和中等破坏,SAFRSSH工况的破坏状态分别为轻微破坏和基本完好。由分析可知,在震动作用下,SAFRSSH的破坏等级比GSSH和SFRSSH的破坏等级有所降低,结构的性能水平得到明显的提高。

### 3 结论

根据研究螺旋锚锚盘埋深、间距及锚盘数对上拔承载特性的影响数值模拟实验,及基于动力时程分析方法,对三种地基基础形式的生土结构房屋进行非线性地震反应分析,所得结论如下:

(1)在埋深比对上拔承载力的影响研究中,当埋深比 $H/D > 9$ 时,上拔力系数减小,增大幅度随之减弱,此时可使螺旋锚发挥最大的上拔承载特性,故埋深比取10.5。

(2)通过对不同间距双片螺旋锚上拔承载力效率进行分析, $S=4.5D$ 和 $S=6D$ 时螺旋锚发挥效率非常相近,然而考虑实际工程应用,故锚盘间距取4.5D。

(3)在A-CAS-000、A-BIR-180和C08-320地震动的不同PGA作用下,与GSSH工况相比SFRSSH和SAFRSSH的顶层位移减幅平均值范围分别为5.6%~19.7%和62.9%~75.0%。螺旋锚复合基础在震动A-CAS-000作用下,其轴力最大值为38.4 kN小于螺旋锚的极限上拔承载力45.8 kN。在震动作用下,SAFRSSH的破坏等级比

GSSH 和 SFRSSH 的破坏等级均有所降低。经过统计对比可以发现,螺旋锚复合基础能提高结构的整体抗震性能,在地震动作用下的螺旋锚轴力最大值未达到极限上拔承载力,基础未造成破坏,坚实可靠,且其破坏等级较比其他两个工况有所降低,结构的性能水平得到明显的提高,因此可在村镇生土建筑中推广。

## 参考文献:

- [1] 葛学礼,朱立新,王亚勇,等.村镇建筑震害与抗震技术措施[J].工程抗震,2001,(1):43-48.  
Ge X L, Zhu L X, Wang Y Y, et al. Earthquake damage and seismic technical measures for rural buildings [J]. Engineering Earthquake Resistance, 2001, (1): 43-48. (in Chinese)
- [2] 王兰民,陶裕禄,袁一凡,等.中国地震安全农居示范工程综述[J].西北地震学报,2005,27(4):305-311.  
Wang L M, Tao Y L, Yuan Y F, et al. Summary of China Earthquake whole rural housing demonstration project[J]. Journal of Northwest Seismology, 2005, 27(4): 305-311. (in Chinese)
- [3] 陈榕,符胜男,郝冬雪,等.密砂中圆形锚上拔承载力尺寸效应分析[J].岩土工程学报,2019,41(1):78-85.  
Chen R, Fu S N, Hao D X, et al. Size effect analysis of uplift bearing capacity of circular anchor in dense sand [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(1):78-85. (in Chinese)
- [4] 王杰,杜秋男,孙海峰,等.砂土中螺旋锚极限抗拔承载力研究[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2009(1):66-70.  
Wang J, Du Q N, Sun H F, et al. Study on ultimate uplift bearing capacity of spiral anchor in sand [J]. Journal of Shenyang Architecture University (Natural Science Edition), 2009(1):66-70. (in Chinese)
- [5] Meyerhof G G, Adams J I. The ultimate uplift capacity of foundations [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1968, 5(4):225-244.
- [6] Merifield R S. Ultimate up lift capacity of multiplate helical type anchors in clay [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2011, 137(7):704-716.
- [7] 刘成清,陈驰,何广杰,等.生土建筑的抗震性能分析与评估[J].建筑结构,2014,44(19):67-71.  
Liu C Q, Chen C, He G J, et al. Seismic performance analysis and evaluation of raw soil buildings [J]. Building Structure, 2014, 44 (19):67-71. (in Chinese)
- [8] 于文,葛学礼,朱立新.新疆喀什老城区生土房屋模型振动台试验研究[J].工程抗震与加固改造,2007,29(3):24-29.  
Yu W, Ge X L, Zhu L X. Shaking table test of raw soil house model in the old urban area of Kashgar, Xinjiang [J]. Earthquake Resistance and Reinforcement of Engineering, 2007, 29 (3):24-29. (in Chinese)
- [9] Tarque N, Crowley H, Pinho R, et al. Displacement-based fragility curves for seismic assessment of adobe buildings in Cusco, Peru [J]. Earthquake Spectra, 2012, 28(2):759-794.
- [10] Prabakar J, Sridhar R S. Effect of random inclusion of silical fibre on strength behaviour of soil [J]. Construction and Building Materials, 2002, 16(2):123-131.
- [11] 马小刚.陇东地区传统生土建筑建造技术调研与发展研究[D].西安:长安大学,2013.  
Ma X G. Research on construction technology and development of traditional raw soil buildings in Longdong area [D]. Xi'an: Chang'an University, 2013. (in Chinese)
- [12] 郝冬雪,陈榕,符胜男.砂土中螺旋锚上拔承载特性模型试验研究[J].岩土工程学报,2015,37(1):126-132.  
Hao D X, Chen R, Fu S N. Model test study on uplift bearing characteristics of screw anchor in sand [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(1): 126-132. (in Chinese)
- [13] 郝冬雪,宋阳,陈榕,等.黏土中螺旋锚几何尺寸对上拔承载力影响的数值分析[J].东北电力大学学报,2018,38(4):6.  
Hao D X, Song Y, Chen R, et al. Numerical analysis of the effect of geometric size of spiral anchor in clay on uplift bearing capacity [J]. Journal of Northeast Electric Power University, 2018, 38(4):6. (in Chinese)
- [14] 郝冬雪,符胜男,陈榕,等.砂土中锚板拉拔模型试验及其抗拔力计算[J].岩土工程学报,2015,37(11):2101-2106.  
Hao D X, Fu S N, Chen R, et al. Pull out model test of anchor plate in sand and calculation of its pullout resistance [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(11):2101-2106. (in Chinese)
- [15] 李袁昊.改性夯土墙体结构的有限元数值模拟分析[D].绵阳:西南科技大学,2017.  
Li Y H. Finite element numerical simulation analysis of modified rammed earth wall structure [D]. Mianyang: Southwest University of science and technology, 2017. (in Chinese)

(本文编辑:苏泽云)

(下转第 796 页)