

DOI: 10.11779/CJGE202203017

强震作用下软土地基桩基负摩阻力振动台试验研究

田兆阳^{1,2,3}, 李平^{*1,3}, 朱胜¹, 张源¹, 李玉影¹, 刘应慈¹, 周楷¹, 颜灵勇¹

(1. 防灾科技学院, 河北 廊坊 065201; 2. 山东省地震局, 山东 济南 250014; 3. 河北省地震灾害防御与风险评估重点实验室, 河北 廊坊 065201)

摘要: 为研究强震作用下软土地基中桩基负摩阻力的产生机理及分布特性, 设计开展了软土静力学试验、动三轴震陷试验和软土地基-单桩体系振动台试验, 验证了震陷软土地基对桩基的负摩阻力作用, 得到了软土的震陷特性、不同输入地震动下桩土体系地震动响应和桩基负摩阻力分布发展规律, 讨论了强震作用下负摩阻力的产生及发展过程。结果表明: ①软土震陷的产生存在一定的屈服动应力, 可利用动三轴试验来初步判断震陷引发负摩阻力的启动震级; ②水平向地震动下负摩阻力主要产生在桩身的上部, 竖向地震动下全桩均会产生负摩阻力; ③震陷引发的桩基负摩阻力具有突发性, 且微小的桩土相对位移量即可产生显著的负摩阻力, 这种瞬时加载可能会对结构造成破坏; ④利用桩侧土体和接触面的抗剪强度可初步估算软土地基中桩基可能受到的负摩阻力值。试验成果可为软土地基桩基负摩阻力的判别与计算提供参考, 对软土地基抗震设防具有一定的理论和工程实用价值。

关键词: 强震; 软土; 桩基; 负摩阻力; 振动台试验

中图分类号: TU435

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2022)03-0550-10

作者简介: 田兆阳(1993—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事岩土工程抗震方面的研究。E-mail: tzy_eqsd@foxmail.com。

Shaking table tests on negative friction of piles in soft soils under strong earthquake motion

TIAN Zhao-yang^{1,2,3}, LI Ping^{1,3}, ZHU Sheng¹, ZHANG Yuan¹, LI Yu-ying¹, LIU Ying-ci¹, ZHOU Kai¹, YAN Ling-yong¹

(1. Institute of Disaster Prevention Science and Technology, Langfang 065201, China; 2. Shandong Earthquake Agency, Jinan 250014, China; 3. Hebei Key Laboratory of Earthquake Disaster Prevention and Risk Assessment, Langfang 065201, China)

Abstract: The negative friction of piles caused by seismic settlement of soft soils will produce the downward loads on pile foundation and cause serious damage to the foundation and structures. In order to study the formation mechanism and distribution characteristics of negative friction of pile foundation in soft soils under strong earthquake motion, the static tests and dynamic triaxial tests on soft soils and the shaking table tests on single pile in soft soil field are carried out. The negative friction on piles caused by seismic settlement of soft soils is proved. The seismic subsidence characteristics of soft soils, the dynamic response of pile-soil system under different input ground motion and the distribution development law of negative friction resistance of piles are obtained. The generation and development of negative friction under strong earthquakes are discussed. The results indicate that: (1) There is a certain yield dynamic stress in the formation of seismic subsidence in soft soils. The dynamic triaxial tests can be used to preliminarily judge the initial magnitude of negative friction induced by seismic subsidence. (2) Under the horizontal ground motion, the negative friction resistance is mainly generated at the upper part of the piles, while under the vertical ground motion, the negative friction resistance is generated at the whole pile. The development law of negative friction resistance is different in these two cases. (3) The negative friction resistance of the pile foundation caused by seismic subsidence of soft soils is sudden. At the initial stage of ground motion loading, the small relative displacement of the piles and soils can produce significant negative friction resistance, so attention should be paid to the damage effect of such instantaneous loads on the foundation and superstructure. (4) The potential negative friction resistance of pile foundation in soft soils can be estimated preliminarily by using the shear strength of pile-side soil and contact surface. The above results may provide reference for the discrimination and calculation of negative friction resistance of pile foundation in soft soil sites, and have certain theoretical and engineering practical value for seismic fortitude of soft soil sites.

Key words: strong earthquake motion; soft soil; pile; negative friction; shaking table test

基金项目: 地震科技星火计划项目(XH20084); 河北省地震灾害防御与风险评估重点实验室开放基金项目(FZ213207)

收稿日期: 2021-04-22

*通信作者(E-mail: chinaliping1981@126.com)

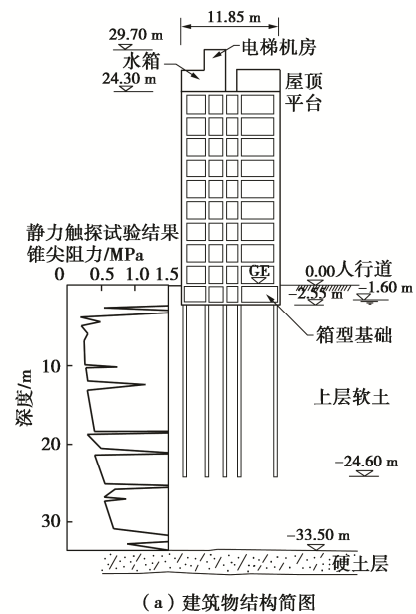
0 引言

软土震陷是指饱和软黏土在动荷载作用下因强度降低发生软化而产生地基沉陷的现象。这种震陷会使土体在桩侧产生下拉荷载, 即负摩阻力。与上部堆载、地基降水等静力作用相比, 软土震陷导致的负摩阻力影响因素多、突发性强, 在与地震作用引起的上部结构惯性荷载共同作用下会造成更严重的地基基础和建筑物破坏。在 1976 年唐山大地震、1978 年日本宫城县地震、1985 年墨西哥大地震以及 2008 年汶川大地震中, 均在出现了坐落在软土地基上的桩基在负摩阻力的作用下产生的不均匀沉降进而造成建筑物破坏的现象。例如, 墨西哥大地震中, 虽然很多建筑物设计中采用补偿基础等措施来减轻静力条件下负摩阻力的影响, 但由于未考虑软土震陷在桩身产生的负摩阻力, 造成地震作用下的承载力安全系数不足, 且上部结构的 $P-\Delta$ 作用加剧了摇摆, 最终使建筑物产生了严重的沉降和倾斜。震害调查发现, 墨西哥城中有 25 栋采用摩擦桩基础的建筑物在地震中产生了较为严重的沉降和倾斜, 其中一栋坐落在软土地基上高 30 m 的 10 层钢筋混凝土建筑, 基础采用高 2.6 m 的补偿基础和直径 0.4 m 长 22 m 的摩擦桩基, 在地震作用下发生地基基础的沉降及倾覆, 其中一侧进入地基中达 6 m, 建筑物结构及破坏情况如图 1 所示。这个典型震例说明软土震陷引起的负摩阻力不但可以直接对地基基础造成破坏, 而且是地震中建筑物严重损毁的重要诱因之一^[1-5]。

20 世纪 40 年代以来, 国内外学者针对软土分布区、大面积填土地区、黄土地区的桩基负摩阻力问题, 从理论计算、现场试验、模型试验和数值模拟等方面开展了大量的研究并取得了丰富的成果^[6-22]。其中, 模型试验可以根据实际需要控制试验模型特性及试验条件, 是研究桩基负摩阻力性状的重要手段之一。Shibata 等^[9]通过室内模型试验研究了受荷群桩的负摩阻力特性以及利用桩身涂层减小负摩阻力的方法; 陆明生^[10]研究了摩擦桩、悬吊桩和端承桩的负摩阻力分布特性; Leung 等^[11]利用土工离心机试验研究了不同受荷条件下单桩负摩阻力的分布特征; 童建国等^[12]利用土工离心机研究了软土地摩擦桩和端承桩负摩阻力的发展规律; 王兰民等^[13]开展了黄土场地震陷与桩基负摩阻力现场爆破试验, 研究了黄土震陷时桩基负摩阻力衍生特征与生成机理; 孔纲强等^[14]开展了桩顶荷载和地面堆载共同作用下的单桩和群桩负摩阻力特性室内模型试验, 研究了桩基负摩阻力的发展规律。这些研究对探究桩基负摩阻力的发展规律及影响因素起着重要的

意义, 但相关成果中桩基负摩阻力的产生主要以静力作用条件引发为主, 涉及地震作用下的软土地桩基负摩阻力的资料较少, 相关作用机制不够清晰。

本文在已有研究的基础上, 以地震作用下软土震陷引起的桩基负摩阻力问题为研究对象, 通过开展软土静动力学试验和振动台模型试验, 研究了震陷软土地中桩基负摩阻力的衍生及发展规律, 对地震作用下桩基负摩阻力的启动、发展及致灾过程进行了讨论, 相关成果对提升软土地抗震水平具有一定的理论和工程实用价值。



(a) 建筑物结构简图



(b) 建筑物破坏情况

图 1 墨西哥城 10 层建筑物震害情况 (Mendoza, 1988)

Fig. 1 Damage of a ten-story building in Mexico City (Mendoza, 1988)

1 模型土参数

1.1 静力学参数

首先对振动台试验所选用的模型土开展了系列试验来研究其基本物理力学指标。模型软土采用软质高岭土和石英砂烘干后按照质量比 1:1 配置, 然后以含水率和密度作为控制指标进行重塑, 土的基本物理指标如表 1 所示。重塑土的孔隙比大于 1, 满足软土的定义。

采用直剪试验测定重塑软土的抗剪强度特性, 不

同竖向压力下的剪应力与剪切位移关系曲线如图2所示,可见在剪切位移达到1.5 mm时,土体剪应力达到最大值,土体抗剪强度得到充分发挥。土的抗剪强度指标: $c=10.3 \text{ kPa}$, $\varphi=6^\circ$ 。

表1 重塑软土基本物理指标

Table 1 Physical properties of remolded soft soil

名称	含水率 /%	填土密度 /($\text{t}\cdot\text{m}^{-3}$)	孔隙比/%	塑限/%	液限/%	塑性指数
重塑软土	33	1.79	1.04	17.2	42.2	25

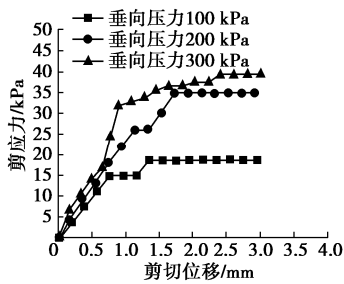


图2 重塑土剪应力与剪切位移关系

Fig. 2 Relationship between shear stress and shear displacement of remolded soft soil

1.2 动力学参数

为研究软土的动力特性,采用美国GCTS公司生产的STX-200型双向动三轴仪分别测定振动台试验模型箱中所取原状软土的动剪切模量比、阻尼比随应变的变化关系以及震陷参数,选取试样直径38 mm、高度76 mm。

(1) 动剪切模量比和阻尼比

将软土试验分别在50, 100, 150 kPa的围压下等压固结8 h,分级施加轴向循环荷载,测定土样在不同轴向应变下的动剪切模量 G_d 和轴向应变 γ_d ,然后对试验数据进行处理,得到动剪切模量和阻尼比随剪应变的变化关系,如图3所示。

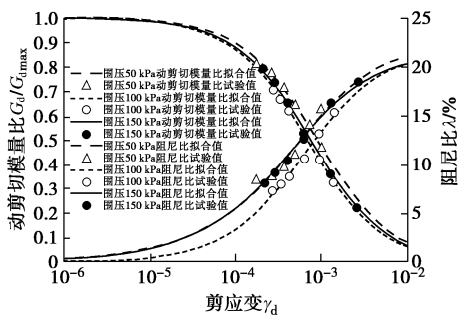


图3 动剪切模量比和阻尼比随剪应变关系变化关系

Fig. 3 Relationship among dynamic shear modulus ratio, damping ratio and shear strain

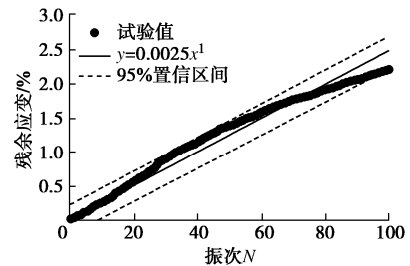
(2) 震陷参数

残余应变是指动应力卸除后土体的残余变形,试验中为动应力作用后试样的变形量与作用前试样高度的比值。利用动三轴震陷试验研究软土残余应变随振次的发展规律,固结围压为100 kPa,轴向施加1 Hz的正弦荷载,动应力为25, 35, 50 kPa,当动应变达到8%或振次达到100周时结束试验。利用指数模型拟合振次和残余应变之间的关系,公式为

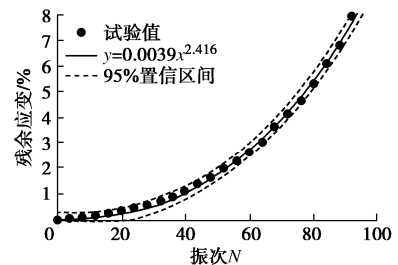
$$\epsilon_p = AN^b \quad (1)$$

式中, ϵ_p 为残余应变, N 为循环荷载振次, A , b 为试验参数。

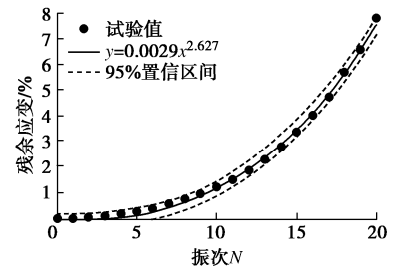
图4给出了典型试样在不同动应力作用下的残余应变随振次的发展情况。当动应力较小时,残余应变与振次的关系表现为线性,振次达到100周时应变值仅有2%;随着动应力增大,残余应变与振次间呈现明显的指数关系,在20次后应变达到8%。



(a) 动应力25 kPa



(b) 动应力35 kPa



(c) 动应力50 kPa

图4 不同动应力下试样残余应变与振次关系

Fig. 4 Relationship between residual strain and vibration times under different dynamic stresses

试验结果表明,软土试样在动力作用下存在临界屈服强度。当动应力较小时,软土试样不易产生残余变形,即不产生震陷。随着动应力增大,软土结构破坏,残余变形随振次的增加明显增大,即当动荷载达

到一定强度时, 场地会产生明显的震陷。该现象对软土震陷的启动条件判别有重要意义, 在实际应用中, 可设计一组动三轴试验, 由小到大施加不同的轴向动应力, 测试土样在该动应力下达到震陷标准 (根据需要选取, 如 2%) 所需的循环次数, 根据等效循环次数与震级的换算关系, 即可利用动三轴震陷试验来初步判断软土地震震陷及引发桩基负摩阻力的启动震级, 亦可判断在设定震级下发生震陷所需的动应力。

2 振动台试验设计

2.1 试验装置

试验所采用振动台为防灾科技学院三向六自由度小型振动台, 台面尺寸 1.5 m×1.5 m, 最大承重 20 kN, 水平向最大加速度 2g, 竖向 1.5g, 台面最大行程±100 mm, 加载频率 0~60 Hz, 可进行循环荷载和随机荷载的加载试验。试验选用刚性模型箱, 尺寸为 0.8 m×0.8 m×1 m (长×宽×高), 壁厚 1 cm。为减小边界效应, 在模型箱振动方向设置 30 mm 厚的聚苯乙烯泡沫板。并在模型箱接缝处做了防水处理, 底部安装排水阀门以控制排水条件。模型体系如图 5 所示。

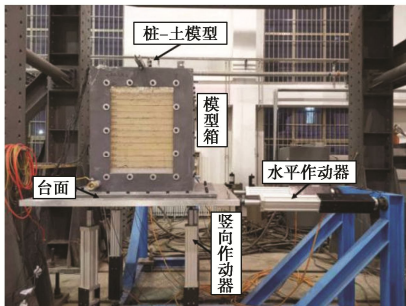


图 5 试验模型体系

Fig. 5 Test model system

2.2 模型相似比设计

本试验为包含桩与土体的缩尺模型试验, 主要目的是根据试验数据对负摩阻力的产生机理和规律进行定性分析, 模型相似关系不作为试验的重点。如需将试验规律反映到原型, 可通过以下相似关系进行基本的预测。表 2 以模型尺寸、弹性模量和密度作为控制量, 模型桩及场地尺寸按照相相似比 1:25 控制, 拉伸试验测得的试桩材料的弹性模量为 3 MPa, C30 混凝土的弹性模量为 30 MPa, 有机玻璃与混凝土的密度比约为 1:2, 根据 Buckingham- π 定理, 计算得到模型主要相似比, 模型桩和地基土采用不耦合设计。

另外, 根据文献[15]的相关结论, 为使软土震陷能够充分发展, 满足试验目的, 在地震动加载时采用未压缩的原始持时地震动记录。

表 2 模型主要相似参数

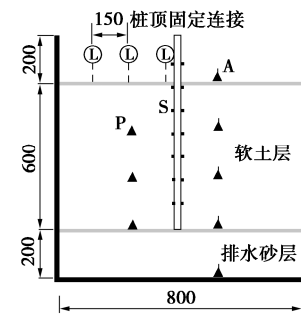
Table 2 Similarity ratios of test model

物理量	相似关系	桩相似比	土体相似比
长度	S_L	1:25	1:25
位移	S_r	1:25	1:25
密度	S_ρ	1:2	1:1
弹性模量	S_E	1:10	1:1
加速度	S_a	1.0	1.0
时间	S_T	0.09	0.04
应力	S_σ	1:10	1:1
频率	S_ω	11.2	25

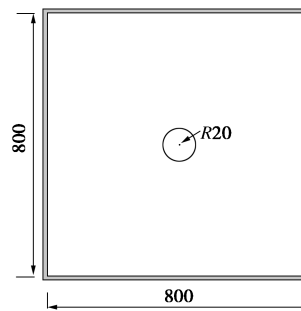
2.3 模型制备与传感器布置

场地成样方式为分层填筑, 首先在底部填筑 200 mm 的排水砂层, 然后将制备好的土料按照预定的密度以每层 100 mm 的厚度称出所需重量土样进行装填, 软土层总厚度 600 mm, 每间隔 200 mm 分层布设加速度和孔压传感器量测土体地震动响应和孔压变化, 在模型土顶部布设顶杆位移计量测土体表层沉降。

试桩选用外径 20 mm, 内径 16 mm 的空心有机玻璃管, 弹性模量为 3 GPa。采用砂纸对桩表面进行粗糙处理, 然后在桩身每隔 100 mm 等间距粘贴 7 组应变片, 每组 4 个共 28 个, 表面用环氧树脂进行保护。试桩布设在软土填筑之前, 其上端固定, 采用悬吊的方式固定于模型箱顶部的横梁上, 插入土中部分为 600 mm, 桩端落在排水砂层顶部, 使其在水平向与模型箱同步运动, 这种布桩方式的目的是观测仅由土体震陷单一因素在桩侧产生的负摩阻力效应。模型概况及传感器布置如图 6 所示。



(a) 振动台模型箱侧视图



(b) 振动台模型箱俯视图

P-孔压计 A-加速度计
L-位移计 S-应变片

尺寸单位: mm

图 6 模型概况及传感器布置

Fig. 6 Model overview and arrangement of sensors

2.4 试验地震动与加载工况

试验选取持时 30 s、频率为 3, 5, 7 Hz 的正弦波, 以及 Landers 地震波调幅作为输入地震动。Landers 地震波为 1992 年美国 Landers 地震中 Joshua Tree 台站的强震记录, 该地震动能量积累过程较慢, 有效持时(能量 5%~95%) 约为 26.8 s, 卓越频率为 1.34 Hz, 加速度时程和傅里叶谱如图 7 所示。

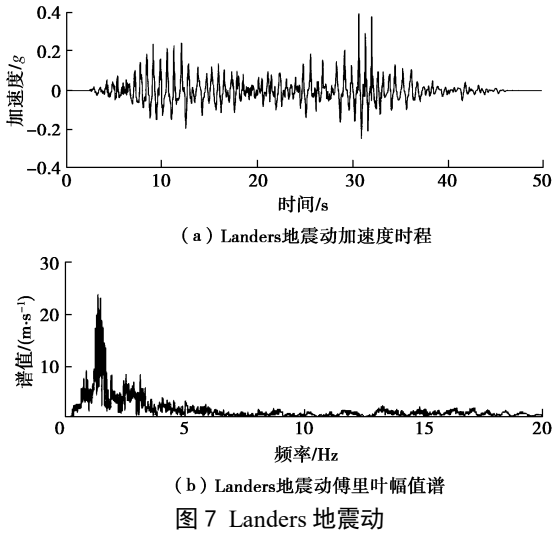


图 7 Landers 地震动

Fig. 7 Landers seismic waves

按照加速度峰值和频率从低到高的顺序进行加载, 不同地震动之间输入白噪声来分析体系的自振频率等动力特性。每次地震动加载结束后, 对传感器输出数据和模型破坏情况进行检查, 静置 30 min 以使土体孔隙水压力消散。在下次加载前将各采集通道平衡清零, 然后继续加载直至所有工况结束。

试验后, 设计数字滤波器对采集到的原始应变数据进行滤波, 以消除环境噪声的干扰, 滤波通频带设定为 0.01~20 Hz。

3 试验结果分析

3.1 宏观现象

试验中, 在地震动峰值较小的情况下, 模型运动幅度较小, 宏观破坏现象不明显。随着地震动加载强度的增大, 土体的振动幅度也逐渐增大, 试验模型出现了土体震陷、桩土界面相对位移、土体表面轻微渗水等现象。图 8 (a) 和图 8 (b) 为试验前和试验最终结束后模型软土场地的破坏情况。最终, 场地表面出现了平行于振动方向的 U 型不均匀震陷, 中心处土体震陷量约为 2.5 cm, 在与加载方向平行的边界中心处震陷量约为 2 cm, 且位于振动方向垂直边界处的土体有一定外翻; 图 8 (c) 和图 8 (d) 为桩土界面的破坏情况, 桩土界面在竖向上产生了 2.5 cm 的相对位移, 且在桩身外 1 cm 的范围内, 土体产生了环状裂缝。

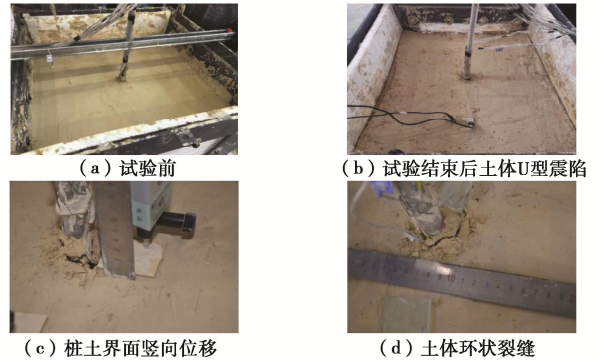


图 8 模型宏观破坏现象

Fig. 8 Macroscopic failure phenomena of model

3.2 加速度放大作用

为了分析模型体系的动力响应, 计算给出了天然波和正弦波水平向加载下土体不同深度处的加速度峰值放大系数, 如图 9 所示。可见, 各工况的地震动峰值放大系数随深度减小而逐渐增大, 最大出现在土层顶部。其中, 天然波的峰值放大系数在 1.0~1.2, 正弦波的峰值放大系数在 1.0~1.7, 两种类型的地震动峰值放大系数均随输入加速度峰值的增大而增大。分析认为产生该现象的原因, 一是正弦波输入峰值较且输入频率也逐渐增大, 对于整体自振频率较高的小型模型, 更容易产生共振, 导致放大系数显著增加; 二是因为所采用的刚性模型箱尺寸较小, 土层厚度薄, 模型的边界效应和重力水平的差异导致了加速度放大系数的增大。

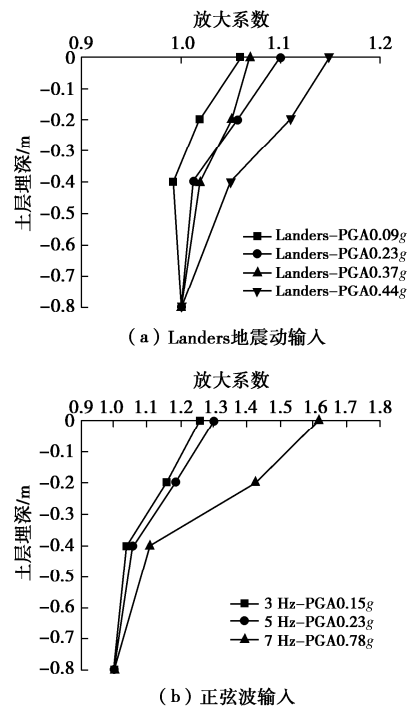


图 9 峰值加速度放大系数随深度的变化

Fig. 9 Variation of peak acceleration amplification factor with depth

3.3 土体孔压、表层震陷和桩身应变时程

在地震动作用下, 软土内部的孔隙水压力会累积上升, 土体模量降低造成地基沉降, 并引发桩基的变形。在本试验中, 为了分析模型体系在地震动作用下土体孔压发展、震陷和桩身的应变产生发展情况, 本文列出了代表性正弦地震波 (7 Hz, PGA=0.78g) 输入下土体内部孔压和场地表层的沉降时程, 如图 10 所示。在地震动加载开始 (图中时间从采集开始时间算起, 不代表地震动加载时间), 土体内部孔压在 5 s 内就达到了最大值, 土体表面沉降也在短时间内迅速增长并随后保持稳定。这种现象符合软土地表在地震动作用下首先因结构破坏发生“触变”, 然后因模量降低继续沉降的规律。

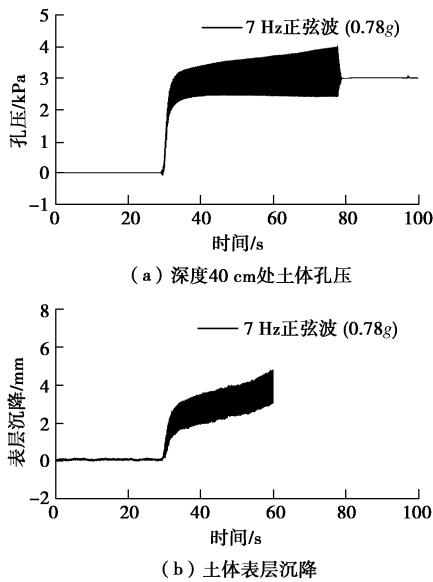


图 10 土体孔压和表层沉降时程

Fig. 10 Time histories of pore pressure of soil and surface settlement

图 11 为水平和竖向地震动加载下桩身测点的典型应变时程, 根据其应变发展特性可有所不同, 以水平向加载地震动分别为 5 Hz (PGA=0.23g) 和 7 Hz (PGA=0.78g) 的正弦波和竖向加载地震动为 5 Hz (PGA=0.2g) 的正弦波的工况为例。

在以上 3 类情况中, 桩身均在地震动加载之初就出现了竖向应变, 且随加载不断增大。当水平向加载时, 应变增速先快后慢, 最终趋于平缓, 初始增长速度和最终应变值受加载强度的影响。在地震动竖向加载时, 桩身应变恒定的速率一直增长到地震动加载结束, 竖向地震的加载中这种现象在负摩阻力随时间的变化中也有所体现, 下文将继续讨论。

3.4 桩身负摩阻力分析

试验中采用悬吊桩这一简化工况, 模型桩受到来

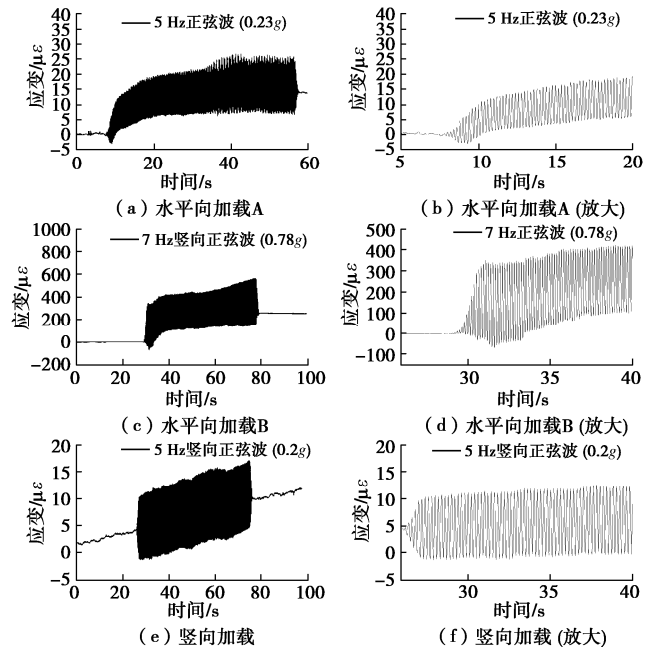


图 11 不同地震动输入下桩身测点应变时程

Fig. 11 Time histories of strain of pile at various measuring points under different ground motions

自模型箱横梁的拉力和桩周土的摩擦力, 为观测模型桩在振动过程中受到的摩擦力特点, 利用各测点的桩身应变数据来计算桩身轴力, 然后通过不同位置间的平均轴力差来得到桩身负摩阻力的分布, 如图 12 所示。由于桩身弹性模量 E 、桩身截面积 A 、应变测点间距 h 和桩身直径 d 已知, 根据下式

$$q = \frac{EA(\epsilon_2 - \epsilon_1)}{h\pi d} \tag{2}$$

即可由桩身测点的应变值求取测点间桩段的平均桩身摩阻力值, 式中 ϵ_1, ϵ_2 为桩单元上下测点的应变值。

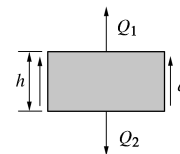


图 12 桩基摩阻力计算示意图

Fig. 12 Calculation of friction resistance of pile foundation

根据上述方法, 计算得出不同工况下模型桩各桩段单位面积上的负摩阻力值。下面给出不同水平向地震动作用下, 从地震动加载开始各时间点的桩身负摩阻力分布情况。其中, 正值代表负摩阻力, 负值代表正摩阻力。由于模型尺寸的影响, 所加载的天然地震动对桩身负摩阻力产生的影响并不大, 此处主要分析正弦地震动加载下模型的响应。

(1) 水平向地震动加载

在水平向地震动加载下, 桩身上部所受的负摩阻力最大, 随着深度的增加, 负摩阻力减小并变化为正

摩阻力，各工况均存在明显的中性点，各地震动作用下桩身负摩阻力的分布如图 13 所示。随着地震动峰值和频率的增加，桩身负摩阻力也迅速增加；除 PGA 为 0.15g 工况下负摩阻力最大值先减小后增大外，其他工况均表现为随时间增加，负摩阻力的最大值在加载前期随时间迅速增大，后期增速变缓的现象。值得说明的是，模型为悬吊桩，负摩阻力主要由桩头处的拉力来平衡，桩身主要受到土体的下拉荷载，导致桩身所受到的正负摩擦力之间并不平衡，但不影响本文对桩身负摩阻力分布特征和中性点位置的判断。

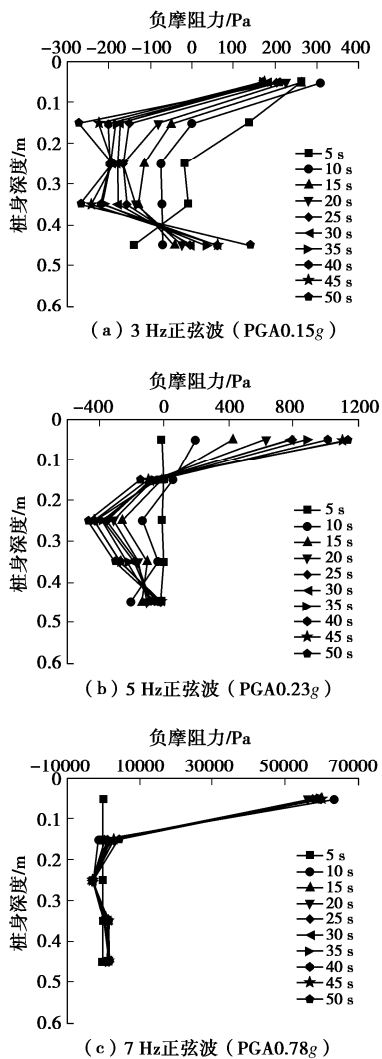


图 13 水平向加载下桩身负摩阻力分布

Fig. 13 Distribution of negative friction of pile under horizontal loads

(2) 竖向地震动加载

竖向地震动加载下的桩身负摩阻力分布情况与水平向加载有所区别，图 14 给出了竖向地震动加载下桩身负摩阻力的分布情况。图 14 (a)，14 (b) 中，竖向加载初期土体对桩身表现为正摩阻力，并逐渐向负

摩阻力发展，最终负摩阻力最大值出现在桩身上部，且全桩也主要表现为负摩阻力，中性点位置不明显。图 14 (c) 中，桩身上部和中部表现为负摩阻力，下部产生了一定的正摩阻力。

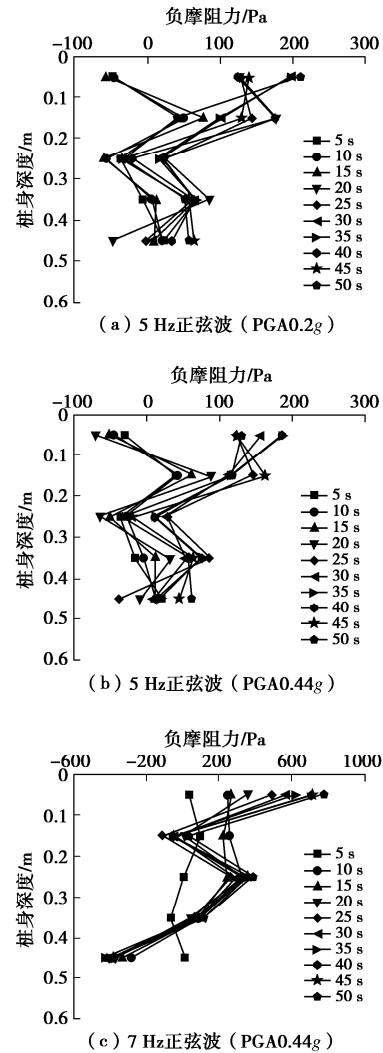


图 14 竖向加载下桩身负摩阻力分布

Fig. 14 Distribution of negative friction of pile under vertical loading

(3) 中性点位置

水平向加载工况下，中性点的位置随加载强度的增大有所加深，总体变化不大。桩身的中性比约在 0.2~0.3，小于工程现场测试中由静力作用引起的桩身负摩阻力中性比，但其沿深度变化规律符合模型中场地震陷量的分布规律。

竖向加载工况下，由于全桩都会出现负摩阻力，桩身中性点的位置不明确。整体而言，其深度要大于水平地震动加载下的情况。由这种分布可以推测，仅考虑水平向加载的振动台试验对桩身中性比的预测偏低。

4 强震作用下负摩阻力的产生及发展过程

4.1 强震作用下桩基负摩阻力的产生

软土地震陷引发桩基负摩阻力的基本过程可表述为: 在地震动作用下, 软土发生结构破坏, 抗剪强度等力学指标降低, 发生土体的震陷, 这种震陷使土体相对桩身产生向下的位移, 从而引起负摩阻力。由动三轴震陷试验和振动台试验可知, 软土发生“触变”的特点是在动荷载加载之初就会产生较大的沉降, 而微小的桩土相对位移量即可产生显著的负摩阻力, 因此强震作用下桩身负摩阻力的产生具有较强的突发性, 可在发震后数秒内完成。

桩身负摩阻力的产生取决于场地是否发生震陷。上文中动三轴试验表明, 软土震陷的产生存在临界动应力。动应力较小时, 土体结构性未被破坏, 不会发生震陷; 当动应力超过临界后, 软土残余变形随振次呈指数形态发展, 即产生明显的土体震陷, 此时会在桩身产生负摩阻力。因此, 桩身负摩阻力产生条件的判别主要因素是确定软土震陷的临界荷载, 可基于动三轴震陷试验结果获得。即根据试验中发生震陷的临界动应力振幅换算临界地面峰值加速度, 根据振次来换算可能发生震陷的等效震级。

4.2 强震作用下桩基负摩阻力的发展

文献[13]指出, 震陷引起的桩基负摩阻力来源于桩周土体的沉降产生的重力势能损失, 并且通过桩周土及桩土接触面的剪切变形传递到桩身。可见, 桩基负摩阻力值受土体沉降量、桩周土抗剪强度和桩土接触面抗剪强度的控制。震陷条件下桩基负摩阻力的最大值等于桩周土抗剪强度和桩土接触面抗剪强度中的较小值, 可由下式表示:

$$f = [K_0(\sigma_{v0} + \sigma_{vd}) + \sigma_{hd}] \tan \varphi + c \quad (3)$$

式中 f 为负摩阻力; K_0 为土体的侧压力系数, 无资料时可使用公式 $K_0 = 1 - \sin \varphi'$ 估算, φ' 为土体的有效内摩擦角; σ_{v0} , σ_{vd} 分别为土体在某时刻的自重应力和竖向动应力; σ_{hd} 为土体在地震动作用下产生的水平向应力, 可由 Seed 等效方法估算; φ 为土体或桩土接触面的内摩擦角, 应为地震过程中的残余内摩擦角; c 为土体或桩土间的黏聚力。

桩身受到的最大下拉荷载可表示为

$$F = \int_0^z U f(z) dz \quad (4)$$

式中, F 为桩身下拉荷载, U 为桩身直径, z 为桩身中性点位置的埋深。

上述方法未考虑桩周土震陷量对负摩阻力的影响和桩身中性点位置的确定, 可引入折减系数 C_f 来考虑震陷量对负摩阻力的影响, 折减系数取值范围为 $0 \sim 1$, 当震陷量等于场地可能发生的最大震陷量时取 $C_f = 1$ 。

4.3 静动力作用下桩基负摩阻力的联系与区别

静动力作用下, 桩基受到的负摩阻力均来在于桩身和土体的差异性沉降。文献[22]研究表明, 在静力作用下较小的桩土位移即可产生较大的负摩阻力, 这种现象在本文试验中也得到了证实。两种情况下的桩基负摩阻力主要有以下 3 个方面的区别:

(1) 土体沉降的原因

静力作用下, 除湿陷性黄土遇水软化外, 土体的沉降主要来自于外部荷载的作用, 如堆载、固结引起的有效应力增加等。动力作用下土体沉降的主要原因在于结构性土的强度破坏, 受土体自身特性影响较大。

(2) 负摩阻力的产生发展时间

静力作用下, 土体的沉降是缓慢发生的, 负摩阻力的产生需要一定的时间。动力作用下的负摩阻力产生具有突发性, 会对结构造成更严重的破坏。

(3) 负摩阻力的致灾特点

静力作用下, 负摩阻力会直接引发桩基和结构的沉降以及造成桩身和地基持力层的破坏, 影响结构的使用功能。动力作用下, 桩-土-结构体系会产生复杂的相互作用, 负摩阻力既会对体系造成直接破坏, 又会作为诱发因素, 与上部结构的运动共同作用, 造成结构的倾覆与倒塌等严重破坏。

5 结 论

本文针对软土地震陷引起的桩基负摩阻力问题, 开展了室内静动力学试验、水平和竖向加载下的软土地-悬吊桩振动台模型试验, 研究了软土震陷的特性及影响因素, 验证了震陷软土地对桩基的负摩阻力作用, 根据土体孔压、沉降和桩身应变数据的量测结果, 初步解释了强震作用下桩基负摩阻力启动条件和分布发展规律, 给出了桩身负摩阻力的简单估算公式。主要得到以下 4 点结论。

(1) 软土动三轴试验结果表明, 软土震陷的产生存在一定的屈服动应力, 当加载动应力超过一定强度时, 试样即会产生明显的震陷。其残余应变与振次之间的关系可以用指数模型拟合, 可利用室内试验来初步判断震陷引发负摩阻力现象的启动震级。

(2) 振动台试验表明, 软土地震陷会在桩侧产生明显的负摩阻力。水平向地震动作用下, 负摩阻力

主要产生在桩身的上半部分,大小受到地震动峰值和频率的影响;在地震动加载初期,负摩阻力增长迅速,达到一定值保持平稳。竖向地震动作用下,全桩均会出现负摩阻力,并且随加载时间的增加稳定增长;其最大值出现在桩身上部,小于相同幅值频率的水平向地震动加载下引起的负摩阻力。

(3) 水平地震动加载下,软土震陷引起的桩身负摩阻力中性点位置变化不大,桩身的中性比小于静力作用引起负摩阻力情况下的中性比。竖向地震动加载下,由于全桩均会出现负摩阻力,中性点的位置不固定,且考虑竖向地震动加载的情况下,桩身中性点的深度会有所增大。

(4) 软土震陷引发的桩基负摩阻力具有突发性,在地震动加载初期,微小的桩土相对位移量即可产生显著的负摩阻力,应重视这种瞬时加载对可能对地基基础及上部结构所产生的破坏效应。可利用桩侧土体和接触面的抗剪强度来初步估算软土地基中的桩基可能受到的负摩阻力值,以供工程设计参考。

值得说明的是,软土震陷引起的桩基负摩阻力问题涉及面广,理论分析及试验中存在许多难点。本文基于模型试验对该问题进行了初步定性的研究,受到作者水平和试验条件等因素的限制,在布桩形式、土层多样性和试验设备的选择方面仍有待于完善,未来应开展更多试验及相关计算以研究多种因素耦合响应对负摩阻力的影响,以满足实际应用需求。

参考文献:

- [1] 刘恢先. 唐山大地震震害[M]. 北京:地震出版社,1986. (LIU Hui-xian. Tangshan Earthquake Damage[M]. Beijing: Seismological Press, 1986. (in Chinese))
- [2] 江席苗. 汶川地震地基基础震害调查研究[D]. 上海:同济大学,2009. (JIANG Xi-miao. Investigation and Research on Earthquake Damage of Wenchuan Earthquake Foundation[D]. Shanghai: Tongji University, 2009. (in Chinese))
- [3] MENDOZA M J, AUVINET G. The Mexico earthquake of September 19, 1985—behavior of building foundations in Mexico city[J]. Earthquake Spectra, 1988, 4(4): 835 - 853.
- [4] MEYMAND P J. Shaking Table Scale Model Tests of Nonlinear Soil-Pile-Superstructure Interaction in Soft Clay[D]. Berkeley: University of California, 1998.
- [5] 黄雨,舒翔,叶为民,唐益群. 桩基础抗震研究的现状[J]. 工业建筑, 2002, 32(7): 50 - 53. (HUANG Yu, SHU Xiang, YE Wei-min, TANG Yi-qun. Recent studies on seismic resistance of pile foundation[J]. Industrial Construction, 2002, 32(7): 50 - 53. (in Chinese))
- [6] SEED H B, CHAN C K. Clay Strength under Earthquake Loading Condition[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1996, 92: 53 - 78.
- [7] POULOS H G, MATTES N S. The analysis of down drag in end-bearing piles[C]// Proc 7th ICOSMFE, 1969, Mexico.
- [8] CHOW Y K, CHIN J T, LEE S L. Negative skin friction on pile groups[J]. International Journal for Numerical & Analytical Methods in Geomechanics, 1990, 14(2): 75 - 91.
- [9] SHIBATA T, SEKIGUCHI H, YUKITOMO H. Model test and analysis of negative skin friction acting on piles[J]. Soil and Foundations, 1982, 22(2): 29 - 39.
- [10] 陆明生. 桩基表面负摩擦力的试验研究及经验公式[J]. 水运工程, 1997(5): 54 - 58. (LU Ming-sheng. Model tests and experience formula for negative skin friction of a single pile[J]. Chinese Journal of Port & Water Engineering, 1997(5): 54 - 58. (in Chinese))
- [11] LEUNG C F, LIAO B K, CHOW Y K, et al. Behavior of pile subject to negative skin friction and axial load[J]. Soils and Foundations, 2004, 44(6): 17 - 26.
- [12] 童建国, 朱瑞燕. 固结软土中单桩负摩擦离心机模型试验研究[J]. 电力勘测设计, 2006(1): 12 - 15. (TONG Jian-guo, ZHU Rui-yan. The study on single pile negative friction centrifuge model in consolidated soft soil[J]. Electric Power Survey and Design, 2006(1): 12 - 15. (in Chinese))
- [13] 王兰民, 孙军杰, 黄雪峰, 等. 黄土地震震陷时桩基负摩阻力的现场试验研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(3): 38 - 45. (WANG Lang-min, SUN Jun-jie, HUANG Xue-feng, et al. Field tests on negative skin friction along piles along piles caused by seismic settlement of loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(3): 38 - 45. (in Chinese))
- [14] 孔纲强, 杨庆, 郑鹏一, 等. 考虑时间效应的群桩负摩阻力模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(12): 1913 - 1919. (KONG Gang-qiang, YANG Qing, ZHENG Peng-yi, et al. Model tests on negative skin friction for pile groups considering time effect[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(12): 1913 - 1919. (in Chinese))
- [15] 许成顺, 豆鹏飞, 高苗成, 等. 地震动持时压缩比对可液化地基地震反应影响的振动台试验[J]. 岩土力学, 2019, 40(1): 147 - 155. (XU Cheng-shun, DOU Peng-fei, GAO Liu-cheng, et al. Shaking table test on effects of ground motion duration compression ratio on seismic response of liquefied foundation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(1): 147 - 155. (in Chinese))
- [16] 田兆阳, 李平, 郑志华, 等. 软土动力特性动三轴试验

- 研究[J]. 地震工程学报, 2017, **39**(1): 95 - 99. (TIAN Zhao-yang, LI Ping, ZHENG Zhi-hua, et al. Dynamic triaxial tests on dynamic characteristics of soft soil[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2017, **39**(1): 95 - 99. (in Chinese))
- [17] 李平, 田兆阳, 肖瑞杰, 等. 基于三轴试验的软土震陷简化计算方法研究[J]. 震灾防御技术, 2017, **12**(1): 145 - 156. (LI Ping, TIAN Zhao-yang, XIAO Rui-jie, et al. Study of simplified calculation method for seismic settlement of soft soil based on triaxial test[J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2017, **12**(1): 145 - 156. (in Chinese))
- [18] 吴跃东. 软土震陷计算方法及影响研究[D]. 南京: 河海大学, 2008. (WU Yue-dong. Calculation of Soft Soil Seismic Settlement and Impact Studies[D]. Nanjing: Hohai University, 2008. (in Chinese))
- [19] 律文田, 冷伍明, 王永和. 软土地区桥台桩基负摩阻力试验研究[J]. 岩土工程学报, 2005, **27**(6): 45 - 55. (LÜ Wen-tian, LENG Wu-ming, WANG Yong-he. In-situ tests on negative friction resistance of abutment piles in soft soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, **27**(6): 45 - 55. (in Chinese))
- [20] 夏力农, 王星华, 蒋春平. 桩顶荷载对桩基负摩阻力特性的影响[J]. 防灾减灾工程学报, 2005(4): 11 - 14. (XIA Li-nong, WANG Xing-hua, JIANG Chun-ping. Influence of working load on negative skin friction characters of pile[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2005(4): 11 - 14. (in Chinese))
- [21] 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 Xue-lei, CUI Chun-yi, SUN Zong-guang. Shaking table tests on the seismic response characteristics of characteristics of a free field in saturated soft soil[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2019, **41**(1): 108 - 116. (in Chinese))
- [22] 孔纲强. 群桩负摩阻力特性研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2009. (KONG Gang-qiang. Study on Negative Friction Resistance Characteristics of Pile Group[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2009. (in Chinese))

(上接 473 页)

《岩土工程学报》青年论坛学术活动进展报告

附录 3:《岩土工程学报》青年论坛第三专题: 极端环境下的岩土工程报告列表

1. 微生物固化多尺度试验、机理与理论 (重庆大学肖杨教授)
2. 极端环境下岩体内应力波传播研究 (北京工业大学范立峰教授)
3. 突发堆载环境下运营软土盾构隧道结构劣化机理与韧性提升 (同济大学张东明教授)
4. 大湾区极端环境桩基服役问题探索 (深圳大学包小华教授)
5. 考虑极端养护温度影响的水泥固化淤泥强度预估方法 (武汉大学章荣军教授)
6. 极端气候条件下土水相互作用理论研究进展 (湖南大学张超教授)
7. 机场道基积水机制、探测及计算探讨 (中南大学张升教授)
8. 高聚物注浆技术在地下排水管道非开挖修复中的应用 (郑州大学方宏远教授)

附录 4:《岩土工程学报》青年论坛第四专题: 岩石动力学及分析方法报告列表

1. 环境条件对断层活化模式的影响研究 (中科院武汉岩土所张传庆研究员)
2. 基于率型本构模型的动力连续-非连续方法研究及应用 (辽宁工程技术大学王学滨教授)
3. 复杂损伤条件下砂岩动态力学特性研究 (中国矿业大学浦海教授)
4. 4D-LSM 在岩石动力学中的应用初探 (天津大学赵高峰教授)
5. 基于线性储能规律的岩爆倾向性判据 (东南大学宫凤强教授)

6. 超高速动能武器钻地毁伤效应与工程防护 (陆军工程大学李杰副教授)
7. 深部地下工程动力灾害微震监测预警与防控 (四川大学徐奴文教授)
8. 地震触发地质灾害: 数据库、机理与概率评估 (应急管理部国家自然灾害防治研究院许冲研究员)
9. 含结构面岩体应变岩爆特征及其支护理论 (河北工业大学聂雯教授)
10. 岩石循环荷载累积损伤的宏观表象与等效表征 (华侨大学俞缙教授)

附录 5:《岩土工程学报》青年论坛第五专题: 软土地基排水固结理论与工程实践报告列表

1. 透水管桩技术研究进展: 力学性能、沉桩模拟和承载力发挥 (广西大学吴文兵、梅国雄教授)
2. 固废在软土固化利用中的理论探讨 (东南大学邓永锋教授)
3. 真空预压联合电渗处理高含水率淤泥试验及计算理论探讨 (河海大学王柳江教授)
4. Soil Stabilisation by Biopolymers (英国华威大学 Xue-yu GENG 博士)
5. 环保节能式真空预压技术 (鑫泰岩土科技有限公司金亚伟总工)
6. Biodegradable Fibre Drains - A Sustainable Solution for Ground Improvement-Thanh Nguyen 博士 (University of Technology Sydney)
7. 基于谱方法的层状竖井地基固结模型研究进展与应用 (南京水利科学研究院许滨华博士生)