

掺细料砾石土的动孔压特性探讨^①

罗会武¹, 彭旭¹, 陈生水², 刘恩龙¹

(1. 四川大学水利水电学院 水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 四川 成都 610065;

2. 南京水利科学研究所, 江苏 南京 210029)

摘要:地震荷载作用下发生滑坡的滑动带通常由粗颗粒与细颗粒组成。滑带土的动力性质及动孔隙水压力的发展对边坡的稳定性至关重要。对掺细料砾石混合土进行动三轴试验来探讨细料(粒径小于 0.5 mm)含量对砾石(粒径 6~20 mm)混合土的动孔压特性的影响, 进行细料含量为 0%、20% 和 40% 的三组试样的动三轴试验, 采用固结围压为 100 kPa、固结应力比为 1.0、频率为 1.0 Hz, 施加轴向动应力分别为 0.50、0.55、0.60 和 0.65 kN, 得到动孔压的变化规律。试验发现:(1)相同激振力作用下, 随着细料含量的增加, 动孔隙水压力增长速度逐渐变缓; 相同细料含量时, 随着激振力的增大, 动孔隙水压力增长速度变快。(2)激振力较大和细料含量较少时, 动孔隙水压力在较少的振次下达到较大值并趋于稳定。(3)细料含量为 20% 的砾石混合土试样在试验终止时的振动次数最大, 细料含量为 40% 的砾石混合土在试验终止时的振动次数最小。(4)当细粒含量为 0% 和 20% 时, 试验终止时最终的孔压都可以接近固结围压; 当细粒含量为 40%, 激振力较大时, 试验终止时最终的孔压才接近固结围压, 而激振力较小时最终的孔压远远没有达到固结围压。

关键词:掺细料砾石土; 动孔压; 动三轴试验; 动力特性

中图分类号: TU411

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2015)01-0034-06

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2015.01.0034

Discussion on Dynamic Pore Pressure Properties of Gravelly Soil Mixed with Fine Grains

LUO Hui-wu¹, PENG Xu¹, CHEN Sheng-shui², LIU En-long¹

(1. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, College of Water Resource & Hydropower, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065 China; 2. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing, Jiangsu 210029, China)

Abstract: Under seismic loading, sliding bands originating from landslides are usually composed of coarse and fine grains. The dynamic features of sliding-band soils and the development of dynamic pore water pressure during the cyclic loading process are extremely important to the stability of slopes. Dynamically cyclic triaxial tests on gravels including fine particles smaller than 0.5 mm were conducted to investigate the influence of fine particles on the dynamic pore water pressure features of these mixed soil gravels of 6~20 mm. Three groups of specimens with fine contents of 0%, 20%, and 40% were tested using a triaxial dynamic apparatus wherein the consolidation confining pressure was 100 kPa, the ratio of consolidation was 1.0, and the frequency was 1.0 Hz. Dynamic axially cyclic stress of 0.50 kN, 0.55 kN, 0.60 kN, and 0.65 kN was applied to each group. The specimen shape was cylindrical, and the specimen size was 100 mm × 200 mm. The dry

① 收稿日期: 2014-08-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(91215301)

作者简介: 罗会武(1988—), 男, 硕士生, 主要从事岩土工程方面的科研工作. E-mail: luohuiwu2009@126.com

通讯作者: 刘恩龙(1976—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土材料本构关系和数值分析方面的教学与科研工作.

E-mail: liuenlong@scu.edu.cn

densities of the specimens with fine contents of 0%, 20%, and 40% were 1.605 g/cm^3 ; 1.741 g/cm^3 , and 1.570 g/cm^3 , respectively. After the tests were concluded, the development of dynamic pore water pressure and its evolution laws were obtained and analyzed in detail. It was experimentally determined that under the same dynamic load, a more rapid increase in dynamic pore water pressure occurs when the fine soil particle content is small; when the content is high, the speed is lower. For the same fine grain content, a small dynamic load resulted in a low speed increase of dynamic pore water pressure; when the dynamic load was high, the increase was rapid. Moreover, a larger dynamic load and smaller fine grain content resulted in relatively larger dynamic pore water pressure of soil specimens that tended to be stable. The number of the dynamic cycles was largest (smallest) when the specimen with fine content of 20% (40%) was wreck. At the end of the experiment, the pore water pressure of the soil specimen was close to the consolidation confining pressure with fine contents of 0% and 20%. For the specimens of 40% fine content, the pore water pressure was close to the consolidation confining pressure under a high dynamic load.

Key words: gravels mixed with fine grains; dynamic pore pressure; dynamic triaxial test; dynamic properties

0 引言

“5·12”汶川地震是建国以来破坏性最强的地震,造成了大规模的地质灾害,特别是突发性的大面积滑坡。根据我国西南地区地震滑坡的现场情况来看,大量的破坏面都是由较粗粒和较细粒组成的滑带土构成的^[1-2]。所谓滑带土是指在滑动过程中经过一系列研磨、剪切、挤压和搓揉后而破坏形成的一层由土和碎石构成的混合土体。这层土体介于滑动体和不动土体之间,厚度可以是几毫米,也可以达几米^[3]。研究这种较粗粒与较细粒的混合土的动力性质对了解地震滑坡产生机理有着重要意义。

最近许多学者对粗细粒混合土的动力性质进行了相关研究。曹成林等^[4]通过对来自黄河三角洲的粉质土中掺入质量百分比分别为 15%、9% 和 3% 的黏土进行动三轴试验,得出结论如下:随着剪应力比的增加,达到饱和时所需要的振动次数减少,细粒含量对混合土的影响十分大,随着细粒含量的增加动强度呈现出先降低再增加的趋势。周建等^[5]通过对不同细粒含量的饱和砂土进行动三轴试验,得出结论:当细粒含量小于 30% 时,其扮演的是相似于“滚珠”的角色,随着细粒含量的增加饱和砂土抗液化强度减低;当细粒含量超过 30% 时,饱和砂土抗液化强度随着其含量增加而增加。Abedi^[6]通过对含不同比重砾石的细粒采用控制不同的围压条件和不同干密度进行室内静力三轴试验,认为细粒含量的增加会导致不稳定性的升高,而且当细粒含量达到 20% 时升高趋势开始趋于缓慢。Tsotsos^[7]在一维压缩试验中,将 6 组含不同砂石质量分数的黏

土进行对比,找出了得到最小孔隙比的组合。Ali 等^[8]将取自东欧的粒径很粗的莱顿帕扎德砂掺杂碾碎的细砂,代替以往的孔隙比,而提出“粒间孔隙比”(即 inter-granular void ratio)在相同固结应力下随着不同细砂含量而变化;并发现存在一个明显的转化细粒含量,即在相同的压缩强度下,这个转化含量之前粒间孔隙比随细粒增加而发生缓慢线性变化,而在转化含量之后粒间孔隙比随着细粒的增加而激增。王勇等^[9]通过对含不同质量分数细粒的砂土进行不排水动三轴试验,得出的结论为:当细粒含量低于 30% 时,随着细粒含量的增加动弹性模量逐渐减小;当细粒含量超过 30% 时,随着细粒含量的增加,动弹性模量逐渐增大;阻尼比呈现出相反的规律,界限细粒含量也是 30%。刘恩龙等^[10]也对掺加不同质量分数黏粒(粒径小于 0.075 mm)的粗粒砂(粒径为 1 mm 和 2 mm 之间)混合土进行动三轴试验,发现粗砂粒中掺加黏粒,其含量的增加会改变动强度,而动强度随着黏粒含量的增加呈现先降低后升高,当黏粒含量为 20% 时,动强度最低;相同黏粒含量下,破坏时达到的孔压基本相同。

由以上研究可见,对掺细料的砾石土的动力特性研究较少。本文将细粒(粒径小于 0.5 mm)和粗粒(粒径 6~20 mm)按质量比为 0%:100%、20%:80% 及 40%:60% 三组混合制样。试样直径为 10 cm,施加 1.0 Hz 的轴向动荷载,围压为 100 kPa,固结应力比为 1.0,并对三组试样进行不排水条件下的动三轴试验来初步探讨掺细粒的砾石混合土的动力特性。

1 试样制备及试验方法

所用土料为粒径 6~20 mm 的粗粒(比重为 2.752)和粒径小于 0.50 mm 的细粒(比重为 2.345),按细粒与粗粒的质量比分别为 0%:100%、20%:80%以及 40%:60%制样,即细料含量分别为 0%、20%和 40%三组,相应的干密度分别为 1.605 g/cm³、1.741 g/cm³ 和 1.570 g/cm³。试样为圆柱样,尺寸为 $D \times H = 100 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$,分层击实制样后进行饱和,然后装样进行固结。

三组试样均采用等压固结($K_e = 1.0$; $\sigma_e = 100$

kPa),每组试样施加的激振力分别为 0.50、0.55、0.60 和 0.65 kN。仪器选用为全自动 GCTS 动三轴仪。选取频率 $f = 1.0 \text{ Hz}$ 的正弦波形施加动应力,试验终止时轴向动应变为 10%。

2 试验结果分析

2.1 动孔压特点

图 1、图 2 和图 3 分别给出细料含量分别为 0%、20%和 40%时砾石混合土在激振力为 0.50、0.55、0.60 和 0.65 kN 作用下的动孔压随振动时间的关系曲线。

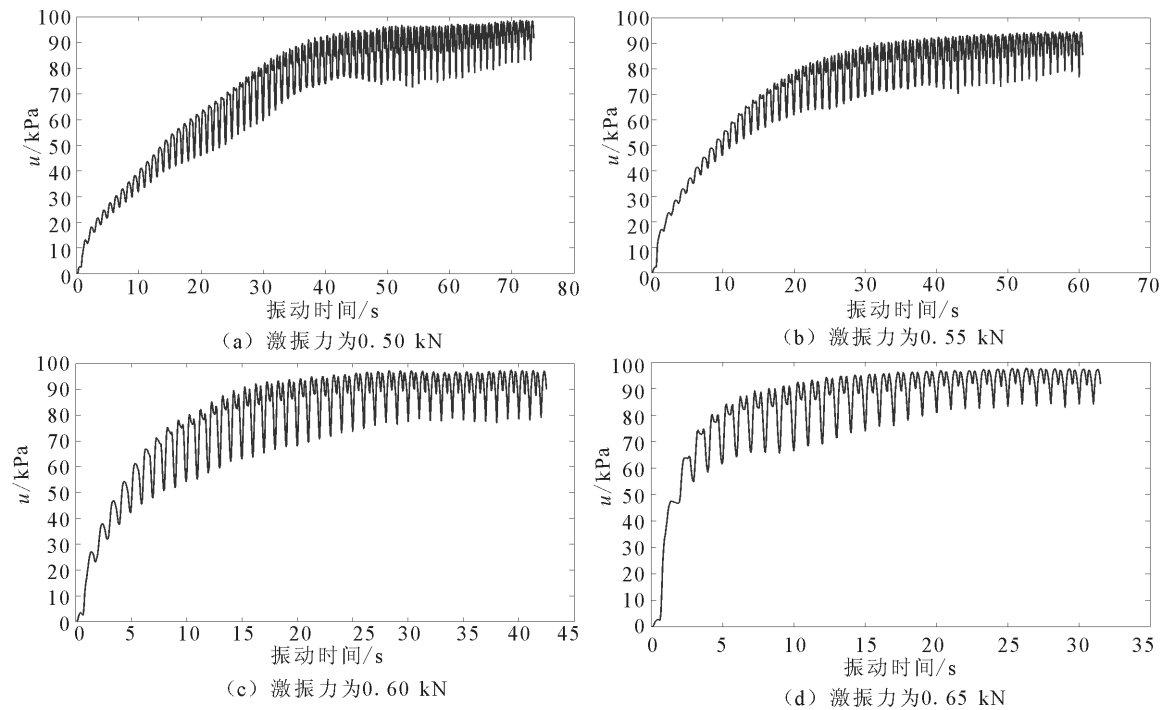


图 1 动孔压-振动时间曲线(细料含量为 0%)

Fig.1 Curves of dynamic pore pressure-vibration time (fines content of 0%)

由动孔压随振动时间变化的关系曲线可以得出:(1)随着振动时间的逐渐增加,动孔隙水压力逐渐增加。细料含量 0%时,动孔隙水压力随振动时间增加得较快,最终可以达到接近固结围压。而细料含量 40%时,动孔隙水压力随振动时间增加得较慢,激振力较小时最终的动孔压远远没有达到固结围压,激振力较大时最终的动孔压接近固结围压。(2)对于相同的试样,激振力越大,随着时间的增加动孔隙水压力增加得越快,孔隙水压力的最大值越大,且试样终止时的破坏次数越小;随着细料含量的逐渐增加,试样终止时的动孔隙水压力却逐渐减小。(3)对于相同的激振力,激振力较小时(如 0.50 kN),

随着细料含量的逐渐增加,试验终止时的动孔隙水压力值呈明显的减小趋势;而激振力较大时(如 0.650 kN),随着细料含量的逐渐增加,试验终止时的动孔隙水压力值呈现的减小趋势不明显。可见细料含量和激振力对掺细料砾石混合土的动孔隙水压力的发展过程有很大影响。

2.2 动孔压演化规律

图 4 为细料含量分别为 0%、20%和 40%时砾石混合土的动孔压(峰值)随振动周次的变化规律。可见,激振力较大时,在较小的振动周次下动孔压增加到较大值并趋于稳定,细料含量越少(即粗料含量越多),孔压上升的越快;激振力较小时孔压上升的

较慢,在较多的振动周次下动孔压才可增加到较大值,且细料含量为 40%时,动孔压随着振动周次的增加一直增大到试验终止时(轴向应变为 10%)都没有稳定,但此时的动孔压远远小于固结围压。

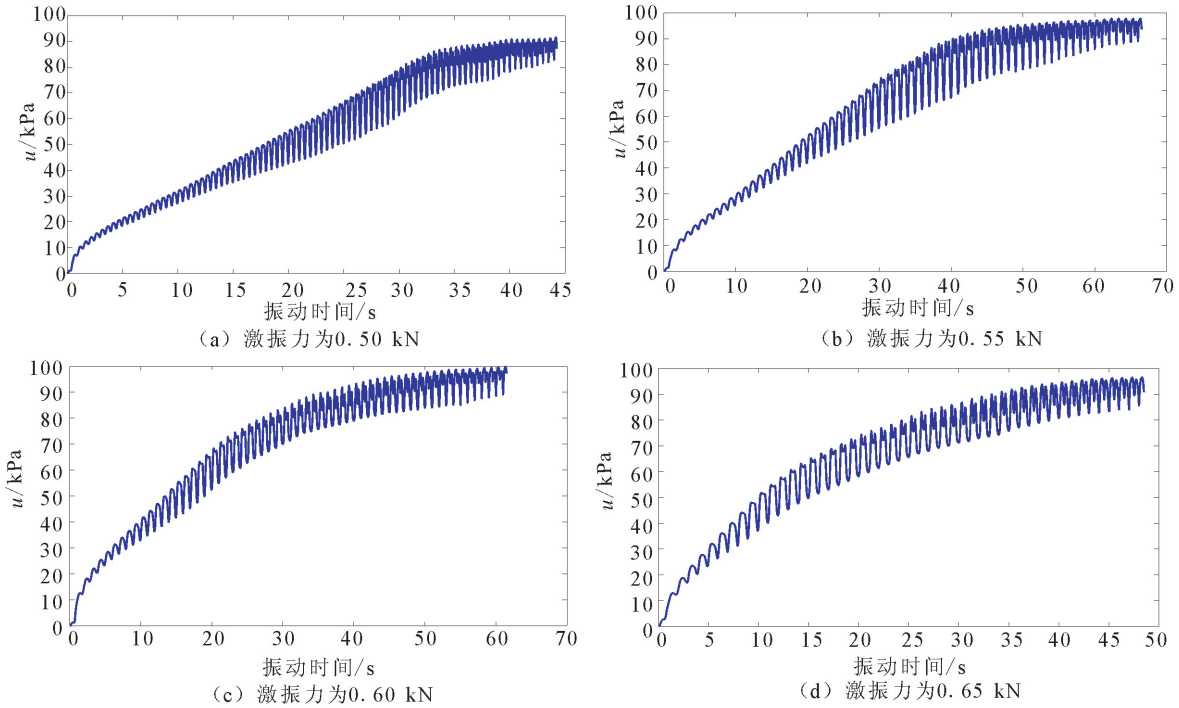


图 2 动孔压-振动时间曲线(细料含量为 20%)

Fig.2 Curves of dynamic pore pressure-vibration time (fines content of 20%)

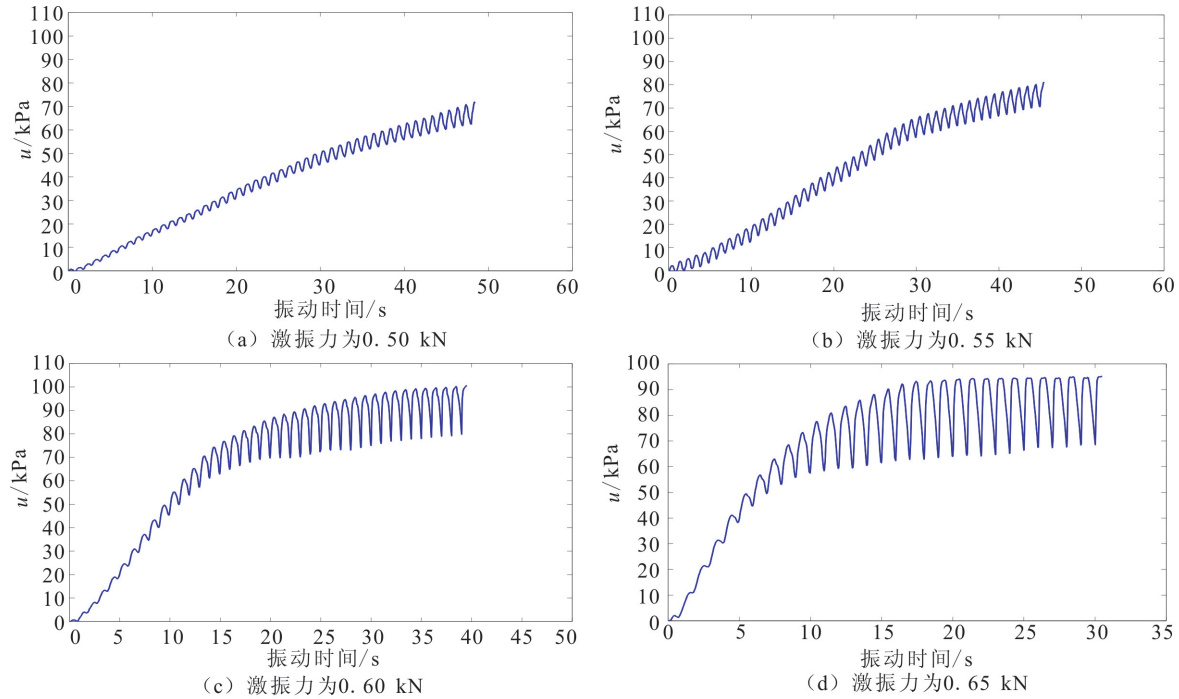


图 3 动孔压-振动时间曲线(细料含量为 40%)

Fig.3 Curves of dynamic pore pressure-vibration time (fine content of 40%)

图 5 为不同激振力下动孔压与固结围压之比与振动周次关系曲线。可见,激振力较小(0.50 kN)时,随着振动周次的增加动孔压与固结围压之比逐渐增加,但增加的速度较为缓慢,细料含量为 0%时的动孔压与固结围压之比较大;激振力较大(0.65

kN)时,随着振动周次的增加动孔压与固结围压之比增加的速度较快,特别是细料含量为 0%时的动孔压与固结围压之比在 10 个振动周期就达到较大的值并趋于稳定。

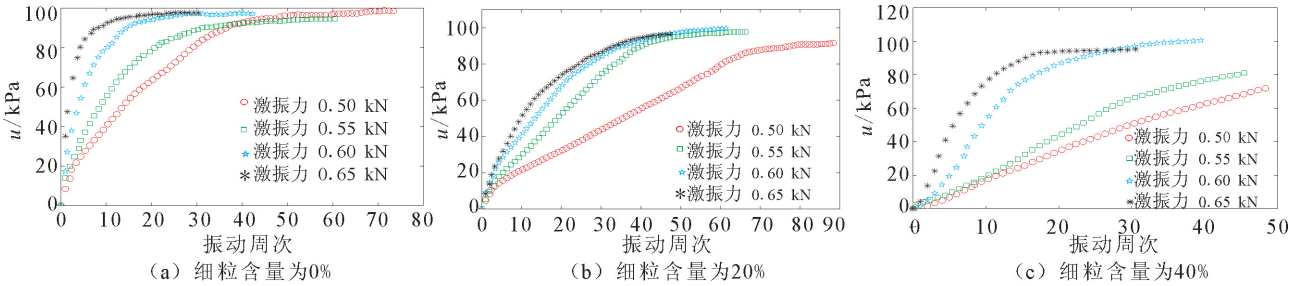


图 4 动孔压-振动周次曲线

Fig.4 Curves of dynamic pore pressure-number of vibration cycles

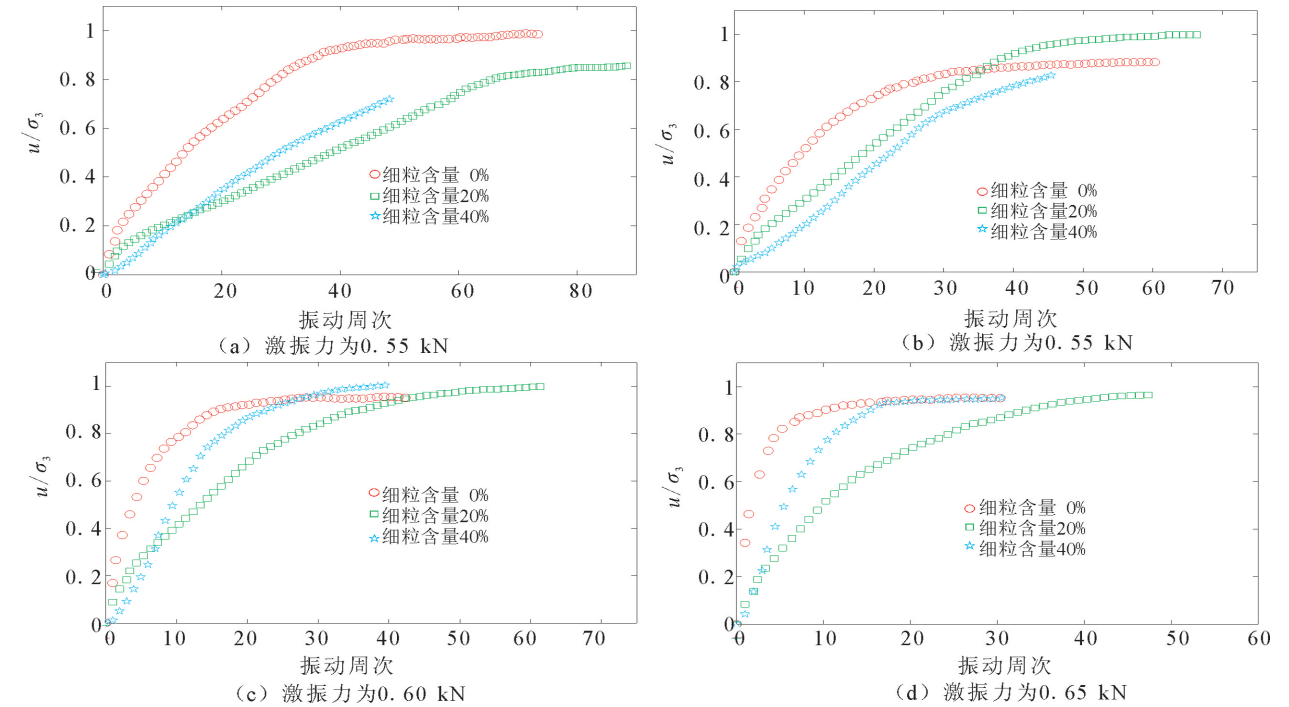


图 5 动孔压/固结围压-振动周次曲线

Fig.5 Curves of dynamic pore pressure/consolidation confining pressure-number of vibration cycles

细料含量为 20%的砾石混合土试样在试验终止时的振动次数最大,而细料含量为 40%的砾石混合土在试验终止时的振动次数最小。这是由于试样的干密度、激振力和试样内颗粒的传力和承载机制所导致的,情况非常复杂,有待进一步的探讨。

3 结论

(1) 细料含量较低时,动孔隙水压力随振动时间增加得较快,最终可以达到接近固结围压。而细料含量较高时,动孔隙水压力随振动时间增加得较

慢,动应力较小时最终的动孔压远远没有达到固结围压。

(2) 激振力较大时,在较小的振动周次下动孔压增加到较大值并趋于稳定,细料含量越少孔压上升得越快;激振力较小时,孔压上升得较慢,在较多的振动周次下,动孔压才可增加到较大值。

(3) 细料含量为 20%的砾石混合土试样在试验终止时的振动次数最大,细料含量为 40%的砾石混合土在试验终止时的振动次数最小。

(4) 当细粒含量为 0% 和 20% 时,试验终止时最终的孔压都可以接近固结围压;当细粒含量为 40% 时,在激振力较大时,试验终止时最终的孔压才接近固结围压,而激振力较小时最终的孔压远远没有达到固结围压。

参考文献(References)

- [1] 袁晓明,曹振中,孙锐,等.汶川 8.0 级地震液化特征初步研究[J].岩石力学与工程学报,2009,28(6):1288-1296.
YUAN Xiao-ming,CAO Zhen-zhong,SUN Rui,et al.Preliminary Research on Liquefaction Characteristics of Wenchuan 8.0 Earthquake[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2009,28(6):1288-1296.(in Chinese)
- [2] 韩金良,吴树人,何淑君,等.5·12 汶川 8 级地震次生地质灾害的基本特征及其形成机制浅析[J].地学前缘,2009,16(3):306-326.
HAN Jin-liang,WU Shu-ren,HE Shu-jun,et al. Basal Characteristics and Formation Mechanisms of Geological Hazards Triggered by the May 12,2008 Wenchuan Earthquake with A moment Magnitude of 8.0[J].Earth Science Frontiers,2009,16(3):306-326.(in Chinese)
- [3] 王恭先,徐峻龄,刘光代.滑坡学与滑坡防治技术[M].北京:中国铁道出版社,2004.
WANG Gong-xian,XU Jun-ling,LIU Guang-dai.Landslidology and Landslide Control Technique[M].Beijing:China Railway Publishing House,2004.(in Chinese)
- [4] 曹成林,孙永福,董斌.不同粘粒含量粉质土的动力强度特性研究[J].海岸工程,2009(28):27-32.
CAO Cheng-lin,SUN Yong-fu,DONG Bin.Study on Dynamical Intensity Features of Silt with Different Clay-particle Contents [J].Coastal Engineering,2009(28):27-32.(in Chinese)
- [5] 周建,杨永香,贾敏才,等.细粒含量对饱和砂土液化特性的影响[J].水利学报,2009(40):1184-1188.
ZHOU Jian,YANG Yong-xiang,JIA Min-cai,et al.Effect of Fines Content on Liquefaction Properties of Saturated Silty Sands[J].Journal of Hydraulic Engineering,2009(40):1184-1188.(in Chinese)
- [6] Mehdi Abedi,Yasrobi S S.Effects of Plastic Fines on the Instability of Sand[J].Soil Dynamics and Earthquake Engineering,2010(30):61-67.
- [7] Tsotsos S,Karaoulanis F E.A New Concept on Compressibility of Mixed Soils: Experimental and Numerical Approach[J].Geotechnical and Geological Engineering,2010(28):199-207.
- [8] Cabalar Ali F.The Effects of Fines on the Behaviour of a Sand Mixture[J].Geotechnical and Geological Engineering,2011(29):91-100.
- [9] 王勇,王艳丽.细粒含量对饱和砂土动弹性模量与阻尼比的影响研究[J].岩土力学,2011(32):2623-2628.
WANG Yong,WANG Yan-lin.Study of Effects of Fines Content on Dynamic Elastic Modulus and Damping Ratio of Saturated Sand[J].Rock and Soil Mechanics,2011(32):2623-2628.(in Chinese)
- [10] 刘恩龙,宋长航,罗开泰,等.粗-细粒混合土动力特性探讨[J].世界地震工程,2010,26(增刊):28-31.
LIU En-long,SONG Chang-hang,LUO Kai-tai,et al.Investigation on Dynamic Mechanical Properties of Mixed Soils Composed of Fine-coarse Particles[J].World Earthquake Engineering,2010,26(Supp):28-31.(in Chinese)