

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2019070401

低围压下埕北海域重塑粉土振动孔压模型试验研究

肖晓¹, 冯秀丽², 林霖², 姜波³, 冯智泉²

1. 中国海洋大学环境科学与工程学院, 青岛 266100

2. 中国海洋大学海洋地球科学学院, 海底科学与探测技术教育部重点实验室, 青岛 266100

3. 珲春市水利局, 珲春 133300

摘要:开展了低围压条件下固结不排水振动三轴实验,对埕北海域重塑粉土振动孔压发展模型进行研究。低围压条件下粉土孔压随振次的发展曲线呈现两种形态,具体呈现何种形态与粉土轴向动应力和临界循环应力有关。对孔压数据进行了归一化处理,发现低围压条件下粉土孔压模型可以用指数函数进行拟合,且黏土含量并不影响孔压模型形式,只会影响 a 、 b 两个实验参数。孔压影响因素分析表明,少量黏粒含量的加入可以使粉土的孔压发展速度增大;振动频率对粉土孔压发展的影响也存在一个临界值,约0.2 Hz,当振动频率小于该值时,粉土孔压增长速度随频率的增加而减缓;当振动频率大于该值时,粉土孔压增长的速度随频率的增加而增大。

关键词:低围压;振动三轴试验;重塑粉土;动孔压模型

中图分类号:P642

文献标识码:A

An experimental research of vibration pore water pressure of remolded silt under low confining pressure: A case from Chengbei sea area

XIAO Xiao¹, FENG Xiuli², LIN Lin², JIANG Bo³, FENG Zhiquan²

1. College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China

2. College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Key Laboratory of Submarine Geosciences and Prospecting, Qingdao 266100, China

3. Hunchun Water Resources Bureau, Hunchun 133300, China

Abstract: A triaxial experiment for vibration pore water pressure of remolded silt was carried out in Chengbei sea area under low confining pressure and consolidated undrained conditions. The results indicate the pore water pressure curve of the silt shows two forms at low confining pressure, depending on the axial vibration stress and/or critical cyclic stress of the silt. After the vibration pore water pressure data was normalized, it is found that the vibration pore water pressure of the silt at low confining pressure changes following a pattern of exponential function and the clay content does not affect much the model except the two experimental parameters a and b . Study of the factors that affect pore water pressure shows that even a small amount of clay may increase the growth rate of pore pressure in remolded silt but there is a threshold of about 10~11%. When the clay content exceeds this threshold the rate of pore pressure will significantly slow down. There is a threshold of vibration frequency in a figure of 0.2 Hz. The increase of the vibration frequency will slow down the growth rate of pore water pressure when the vibration frequency is less than 0.2 Hz but accelerate with the increase in vibration frequency when the vibration frequency is greater than 0.2 Hz.

Key words: low confining pressure; dynamic triaxial test; remolded silt; development law of dynamic pore water pressure

海洋油气管道的安全性直接与管道周边地基土体的稳定性相关。粉土容易在振动中产生液化现象^[1],使土体承载力下降,进而导致管道泄漏等事件。因此,粉土的动强度特性,尤其是孔隙水压力发展特性直接关系到海洋油气管道的稳定性。

目前,国内外学者在循环荷载作用下动孔隙水压力发展方面进行了大量研究,建立了多个模型进行动孔压模型拟合,比较常用的有应力^[2-5]、应变^[6-7]、内时^[8]、能量^[9-10]、有效应力路径^[11]及瞬态^[12]等模型。其中应力模型是将孔压和施加的应力联

资助项目:国家重点研发计划“临海油气管道及陆上终端设施损伤机理与演化规律研究”(2016YFC0802301);国家自然科学基金“自升式平台桩靴基础的全工作周期稳定性分析”(U1806230)

作者简介:肖晓(1990—),女,博士,从事海洋沉积和海洋工程研究, E-mail: oucxiaoxiao@163.com

通讯作者:冯秀丽(1962—),女,博士,教授,从事海洋环境和岩土工程性质研究, E-mail: fengxiuli@ouc.edu.cn

收稿日期:2019-07-04; **改回日期:**2020-05-20. 周立君编辑

系起来, 将孔压表示为应力和振动次数的函数, 最早由 Seed 等^[2]针对饱和砂土提出, 现运用最为广泛。但上述模型多是针对砂土和黏土提出的, 较少应用于粉土。因此, 许多学者开始致力于粉土孔压发展模型的研究。于镰洪和王波^[13]将孔压与循环振次联系起来提出了孔压拟合公式:

$$\mu/\mu_1 = (N/N_f)^{1/\alpha} \quad (K_c > 1.0)$$

式中, μ 为累积孔隙水压力, μ_1 为最大孔隙水压力, N 为循环振动次数, K_c 为固结比, N_f 为试验结束时的振动次数, α 为试验常数, 一般粉土可取 2 或 3。

曾长女等^[14]针对不同黏粒含量的粉土建立了粉土孔压发展曲线:

$$\mu_d/\sigma_3 = a(1 - e^{-b(N/N_f)})$$

式中, μ_d 为振动 N 次的循环峰值振动孔压或称为孔压最大值, σ_3 为试样的初始有效围压, N 为循环振次, N_f 为试验结束时的振动次数, a 、 b 为试验参数, μ_d/σ_3 稳定后的极限值为 1。

针对上述粉土孔压发展指数模型和影响孔压变化的因素, 学者们也进行了大量的室内三轴试验和其他试验方法进行验证和改进: 罗强等通过动三轴试验, 对不同的孔压模型进行了对比, 认为 Seed 孔压模型具有较强的实用性, 但指数模型更适用于描述粉土的孔压发展规律^[15]; 李治朋等认为 100 kPa 围压下粉土孔隙水压力的增长模式不能用统一的 Seed 模型拟合^[16]; 而丁志宇等的研究表明 Seed 孔压模型对 100 kPa 围压下细粒含量低的粉土孔压拟合效果较好^[17]; 马一零等对粉土孔压发展规律进行了室内动三轴试验和有限元对比分析, 发现在振动作用下, 粉土孔隙水压力在前期快速上升, 后期增长逐渐缓慢, 并最终趋于稳定^[18]; 曹成林等的试验认为 50 kPa 围压下, 在动应力幅值比较大时, 粉土的孔压增长速度较快^[19]; 王海龙利用共振柱仪对粉土进行试验, 认为 100~300 kPa 围压下粉土振动孔隙水压力的变化规律可以用二次抛物线拟合^[20]; 刘茜等利用室内动三轴和振动柱试验, 提出了 80 kPa 围压下原状粉土的振动孔压上升模型^[21]; 杨秀娟等试验表明当不同的动荷载作用时, 50 kPa 围压下饱和

粉土在最初的 1/3 振次内孔隙水压力急剧上升, 然后逐渐增大趋于稳定^[22]; 孟凡丽等研究认为 100~200 kPa 围压下, 细粒对粉土的孔压发展影响明显, 在孔压发展的初始阶段黏粒质量占 12% 时增量最显著^[23]; Belkhatir 等通过不排水三轴试验表明, 砂-粉土在有效围压 100 kPa 的情况下, 孔隙水压力随细粒含量的增加呈线性增加, 随粒间孔隙率的增加呈对数增加^[24]。

综上所述, 循环荷载下粉土动孔压方面的研究虽然很多, 但多集中在 50 kPa 以上较高围压条件下进行的, 对于海底管道等埋深较浅的低围压条件下的海洋工程适用性尚未知。埕北海域是我国油气开发的重点区域, 该区海底输油管道常埋藏在 0~5 m 的浅地层中, 且粉土为该区域的主要土质类型。因此, 本文以埕北海域的粉土为研究材料, 通过室内循环动三轴试验获得低围压下粉土的孔隙水压力动力响应特性, 建立粉土的孔隙水发展模型。研究成果可服务于浅表层海洋工程建设。

1 试验土样及方法

1.1 试样制备

本次试验用土均采自埕北海域, 为了控制土体的物理力学性质, 本次试验使用扰动样进行研究, 扰动样的制备方法按照《土工试验规程 (SL237-1999)》^[25]中规定的方法进行。研究表明, 粉土中的黏粒含量, 对粉土的动孔压比有显著的影响。曾长女认为黏粒含量为 3%~15% 时, 粉土动孔压比先减小后增大, 最低点为 8%^[26]; 而孟凡丽的研究认为转折点在 12%^[23], 曹成林的试验则为 9%^[19]。因此, 本试验配制了黏粒含量分别为 8%、10% 和 12% 的三种类型的粉土, 它们的各粒径分布状况如表 1 及图 1 所示。

参考研究区典型土体的物理力学性质^[27], 本次试验所用土体的物理力学性质如表 2 所示。

1.2 试验方法

本文的试验在中国海洋大学海底科学与探测

表 1 试验土样颗粒组成 (%)
Table 1 Particle composition of soil samples

土样	2~1 mm	1~0.5 mm	0.5~0.25 mm	0.25~0.075 mm	0.075~0.005 mm	<0.005 mm (黏粒)
I类土	0	0	6.39	38.12	47.00	8.49
II类土	0	0	2.30	29.25	58.62	9.83
III类土	0	0	0	0.89	87.54	11.77

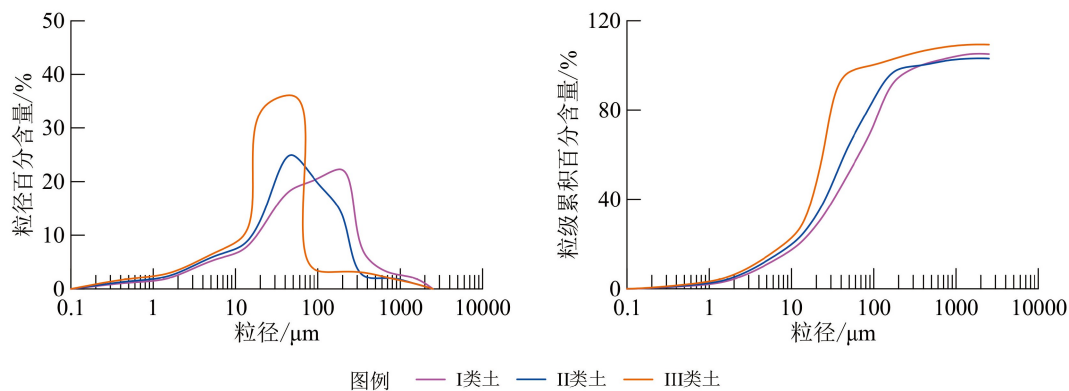


图 1 土样颗粒频率曲线及概率累积曲线图

Fig.1 Frequency and probability accumulation graphs of the soil samples

表 2 土样基本物理性质

Table 2 Physical properties of the soil samples

土样类型	黏粒含量 $M_c/\%$	含水率 $\omega/\%$	饱和密度 $\rho/(\text{g}/\text{cm}^3)$	干密度 $\rho_d/(\text{g}/\text{cm}^3)$	比重 G_s	孔隙比 e
I类土	8	19.7	1.92	1.54	2.70	0.675
II类土	10	20.2	1.94	1.56	2.70	0.670
III类土	12	20.4	1.96	1.58	2.70	0.668

技术教育部重点实验室进行,使用英国 GDS 公司生产的伺服电机控制的动三轴试验系统(DYNTTS)。

该仪器最大围压为 1 MPa,最大振动频率为 5 Hz,轴向最大位移 100 mm,最大轴向力 5 kN,动态轴压分辨率小于 1 N,位移分辨率为 0.2 μm ,轴向力测量精度高于 0.1%,轴向位移测量和控制精度为 0.07%,并专配高精度孔压传感器,精度达到 0.1%(量程为 10 kPa)。与传统动三轴系统相比,该系统具有精度高、更稳定等优点,为开展低围压条件下粉土孔压模型研究提供了技术支持。

本次试验采用固结不排水振动三轴实验,将配土制成直径 38 mm、高 76 mm 的重塑土样,然后利用反压饱和法,使试样孔隙压力系数 B 值达到 0.95 以上(饱和土的 B 值为 1),确保土样充分饱和,然后采用均压固结将试样固结 12 h,选择正弦式振动方式振动至土样破坏。孔隙压力系数 B 为在各向应力相等条件下的孔隙压力系数,它是土体在等向压缩应力状态时,单位围压增量所引起的孔隙压力增量。

2 试验结果

2.1 孔压发展特征

国内外研究表明循环振动下粉土孔压发展规律较为一致,都是在振动初期孔压急剧上升,随着

振动次数的增大孔压上升的速度也逐渐变缓,最后趋于稳定^[28-29]。本文利用取自埕北海域的粉土样品,按埕北海域实际土体的情况配置了 I、II、III 三种不同黏粒含量的粉土土样,在不同的围压和振动条件下进行了多组模拟波浪荷载、管道振动等外在荷载的振动试验。不同实验条件下土样孔压数据表明,低围压条件下孔压发展曲线可以分成两种形态,具体呈现哪种形态由土样受到的轴向循环动应力和临界循环应力的大小决定。

图 2 为黏粒含量 8%、10%、12% 的 I、II、III 类粉土在有效围压 30 kPa 下的孔压发展模式。在轴向动应力小于临界循环应力时,三类粉土均表现出随循环振次的增加,孔压先急剧增大,后缓慢减小,最后趋于平缓的发展模式;而当轴向动应力大于临界循环应力时,三类粉土均表现出随循环振次的增加孔压先急剧增大,后缓慢增加,最后趋于平缓的发展模式,这种模式与张建民的 A 型曲线类似^[30]。本试验中,40 kPa 和 50 kPa 围压条件下粉土的动孔压发展曲线呈现出同样的特征。

2.2 低围压粉土动孔压发展模型拟合

由于孔隙水压力的发展对于土体变形和动强度有十分重要的影响,国内外学者对此进行了大量的研究,并提出了各种循环荷载下动孔压发展模型,总结起来主要有 3 类:第 1 类,将孔压与有效围压的比值和循环振次联系起来^[31-34];第 2 类,将孔压

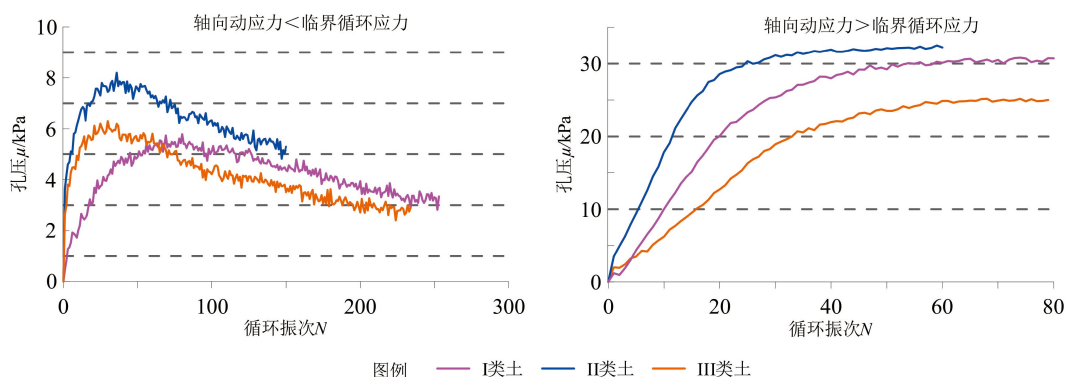


图 2 动孔压发展曲线

Fig.2 Curve of dynamic pore pressure

与有效围压的比值和轴向应变联系起来^[35-38];第3类,将孔压与有效围压的比值和循环振次与破坏振次的比值联系起来^[29-30,39]。

其中,第1类和第2类动孔压发展模型多应用于软黏土;第3类动孔压发展模型多用于砂土。对于粉质土体的孔压发展模型拟合研究较少,且存在较大的争议,仅有的几项研究也是在第3类孔压发展模型的基础上进行适当改进得到了粉土孔压发展模型。

本文借鉴前人研究成果,采用第3类动孔压发展模型,将孔压与有效围压的比值和循环振次与破坏振次的比值建立关系来进行低围压条件下粉土的孔压模型拟合。为使拟合曲线更加科学可靠,本文选择了同一种土在30、40和50 kPa三种不同的围压下的动孔压发展数据进行模型拟合。图3为黏粒含量8%的I类粉土、黏粒含量10%的II类粉土、黏粒含量12%的III类粉土的孔压模型曲线。图中横坐标为孔压与有效围压的比值 μ/σ_3 ,纵坐标为循环振次与破坏振次的比值 N/N_F 。

2.3 孔压影响因素

影响孔压发展的因素有很多,包括超固结比、循环振次、围压、振动频率和动应力等。本文主要选取了黏粒含量和振动频率两个主要影响粉土孔压发展的因素,通过孔压比与振次比之间的关系曲线来探讨低围压条件下黏粒含量和振动频率对孔压发展的影响。

本文将不同黏粒含量的粉土在相同实验条件下的孔压与围压的比值及振次与破坏振次的比值作图,图4是围压30、40、50 kPa条件下黏粒含量8%、10%和12%的粉土的孔压比与振次比关系曲线。将相同黏粒含量的粉土在不同振动频率条件下的孔压与围压的比值及振次与破坏振次的比值

作图,图5为黏粒含量8%、10%和12%的粉土在振动频率0.1、0.2和0.5 Hz条件下的孔压比与振次比关系曲线。

3 讨论

3.1 轴向动应力与临界循环应力对孔压发展趋势的影响

如图2所示,当轴向动应力小于临界循环应力时,曲线大致可分为2个阶段。第1阶段多为循环振次小于约60次的时间内,孔压随循环振次的增加快速上升达到峰值;第2阶段对应于循环振次大于60次,孔压随循环振次的增加缓慢下降,然后趋于稳定。这一孔压发展模式指示了土体在受到较小的轴向动应力时并不发生破坏,而是通过内部调整达到一个新的稳定状态,逐渐适应了这种振动的增密过程。

当轴向动应力大于临界循环应力时,曲线形态为经典孔压发展模式,大致也可分为3个阶段。第1阶段对应于循环振次30次以内,孔压随循环振次的增加急剧增大;第2阶段对应于循环振次30~60次,孔压随循环振次的增加缓慢上升,上升速率明显变缓;第3阶段对应于循环振次60次以上,孔压随循环振次的增加保持稳定,不再发生明显的变化。这一孔压发展模式指示了土体在受到较大的轴向动应力时,一方面,由于粉土的渗透系数较小,在振动初期,孔压不易消散或转移,导致土体内部水压分布不均匀,致使振动初始阶段孔压急剧上升;另一方面,由于粉土中少量的黏粒使粉土具有一定的结构强度和粘聚力,阻碍和限制孔压增大,致使后期不同粉粒含量粉土孔压发展均放缓^[13-14]。

因此,在实际应用中可通过观察地基土孔压发

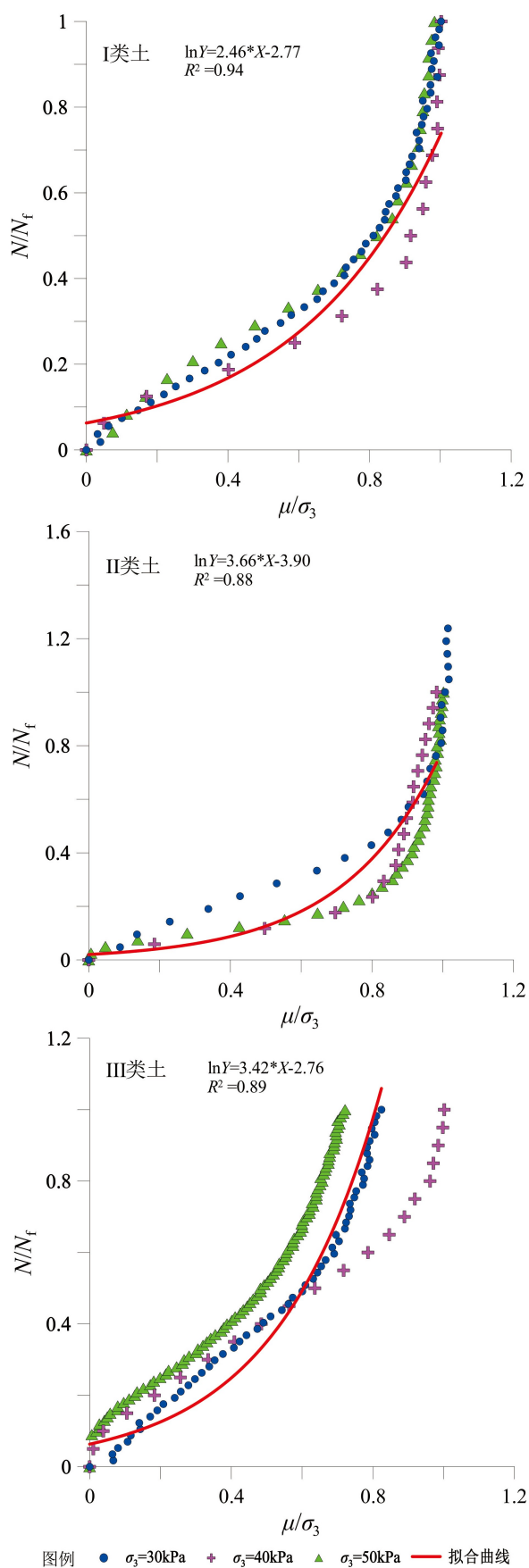


图 3 I、II、III 类粉土孔压发展模型拟合图

Fig.3 Model fitting diagrams of pore pressure development for silt of type I、II、III

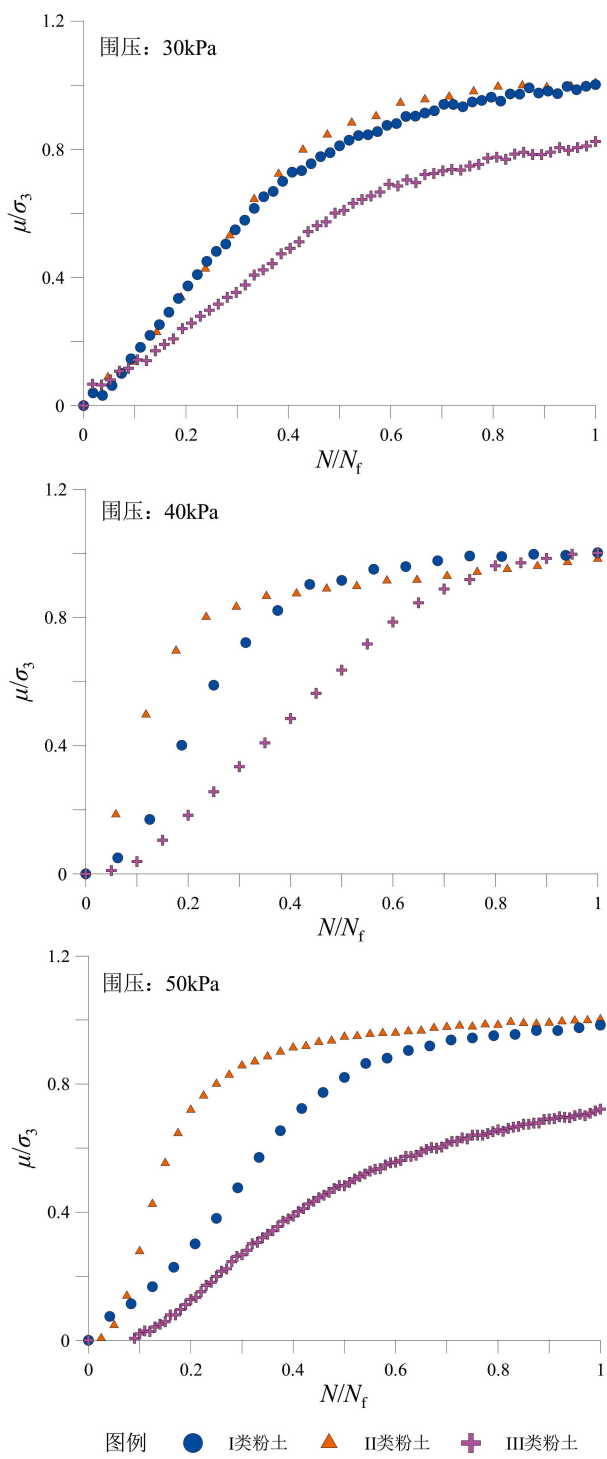


图 4 不同黏粒含量粉土孔压比与振次比关系曲线

Fig.4 Relationship between silt pore pressure ratio and vibration ratio for soils with different clay content

展变化模式来预测地基土体的稳定性,从而达到预防地基土失稳的灾害的发生。建议在管道铺设选址时,除了考虑土体的临界循环应力,还应该测量管道周围可能产生的动应力,判断二者的相对大小,或在危险区布置孔压传感器实时监测孔压发展模式,防止地基土失稳情况的发生。

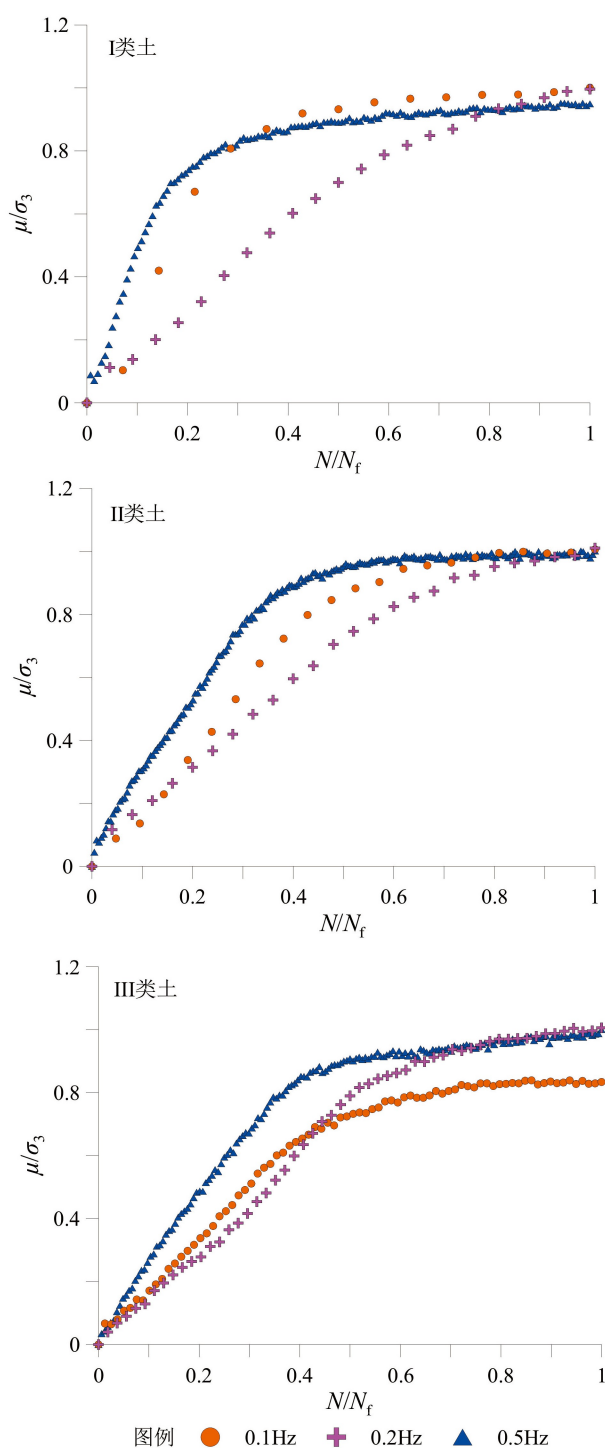


图5 不同振动频率粉土孔压比与振次比关系曲线

Fig.5 Relationship between silt pore pressure ratio and vibration ratio for soils with different vibration frequency

3.2 动孔压发展模型的影响因素

由图3可以看出,三种黏粒含量的粉土不同围压条件下的数据进行归一化处理之后大致落在较为集中的区域之内,拟合相关系数 R^2 较高。对不同黏粒含量的粉土的动孔压发展模型进行拟合,结果如表3所示。

由上可看出,低围压条件下粉土动孔压发展模型可以用指数函数来进行拟合,一般表达式为:

$$\ln\left(\frac{N}{N_f}\right) = a * \left(\frac{\mu}{\sigma_3}\right) + b$$

式中, N 为循环振动次数; N_f 为土体破坏时所对应的振动次数; μ 为循环荷载下土体的动孔压; σ_3 为有效围压; a 、 b 为与土性、实验条件有关的实验参数。

由上述的拟合公式可看出:低围压条件下,不同黏粒含量的粉土孔压发展模式基本相同,黏粒含量的不同不会改变孔压发展的趋势,但可能会影响公式中 a 、 b 两个实验参数,从而影响孔压增长的速度。因此,在实际生产中可通过拟合模型来预测孔压发展变化,从而达到预防地基土失稳的情况发生。

3.3 黏粒含量与振动频率对孔压发展的影响

由图4可看出,不同围压条件下,黏粒含量对粉土孔压发展的影响呈现出较为一致的规律:即黏粒含量为10%的粉土孔压在初始阶段上升最快,其次为8%的粉土,上升最慢的是黏粒含量为12%的粉土。由此可看出,低围压条件下,黏粒含量的加入对粉土孔压的发展有明显的影 响,少量黏粒含量的加入可以使粉土的孔压发展速度增大,但存在一临界值,当超过这一临界值时,孔压发展的速度明显减缓。该临界值推测在10%~11%。

这可能是由于低围压条件下黏粒含量在粉土中扮演的角色由“润滑剂”转变为“胶结剂”[40-41]。当土体黏粒含量较少时,土体中的黏粒含量在粉土中扮演“润滑剂”的角色[26,42],相同动应力条件下易产生较大应变,使孔压快速累积,孔压发展速度较快;当黏粒含量大于某一临界值时,黏粒含量在粉土中的职能转变为“胶结剂”,增大了土体的结构强度和粘聚力,使土体对振动荷载的响应越来越不明显,孔压增长速度减缓[42-43]。

由图5可看出,不同振动频率条件下,三种粉土的孔压发展呈现出较为相似的规律:即振动频率对粉土孔压发展有很大影响,振动频率0.5 Hz时,粉土的孔压发展最为迅速;其次为频率0.1 Hz振动条件下的粉土;振动频率为0.2 Hz的粉土孔压发展模式最为缓慢。由此可以看出,当振动频率为0.1~0.2 Hz时,振动频率的增大会使土体振动过程中孔压增长速度变慢;而当振动频率为0.2~0.5 Hz时,粉土孔压发展的增长速度又会随着振动频率的增大而增大。低围压条件下,振动频率对粉土孔压发展的影响存在一个临界值,本次研究发现该临界值为频率0.2 Hz左右,当振动频率小于该值时,粉

表 3 三类粉土的动孔压发展模型参数
Table 3 Parameters of dynamic pore water pressure model for the three types of silt

土样	黏粒含量%	函数表达式	R^2	a	b
I类土	8	$\ln (N/N_f) \approx 2.46 * (\mu/\sigma_3) - 2.77$	0.94	2.46	-2.77
II类土	10	$\ln (N/N_f) \approx 3.66 * (\mu/\sigma_3) - 3.90$	0.88	3.66	-3.90
III类土	12	$\ln (N/N_f) \approx 3.42 * (\mu/\sigma_3) - 2.76$	0.89	3.42	-2.76

土孔压增长速度随频率的增加而减缓;当振动频率大于该值时,粉土孔压增长的速度随频率的增加而增大。

其中的原因机理有待进一步研究,可能与粉土本身的结构有关,粉土本身的结构可抵抗一定频率的振动作用,表现为振动变密的状态,使得土体的孔压发展明显减缓;但当振动频率大于该频率时,土体本身的结构无法抵消该频率的振动,在该频率条件下加速了土体的破坏,使粉土孔压迅速增长。

4 结论

(1)低围压条件下粉土孔压随振次的发展曲线呈现两种形态。在轴向动应力小于临界循环应力时,三类粉土均表现出随循环振次的增加,孔压先急剧增大,后缓慢减小,最后趋于平缓;而当轴向动应力大于临界循环应力时,三类粉土均表现出随循环振次的增加,孔压先急剧增大,后缓慢增加,最后趋于平缓。

(2)低围压条件下粉土孔压模型可以用函数来进行拟合,循环振次比以 e 为底的对数值是孔压比的一次函数,土的性质、黏粒含量和试验条件只会改变其斜率和截距,而不改变函数形式。

(3)低围压条件下,黏粒含量对粉土孔压的发展有一定影响,少量黏粒含量的加入通常可以使粉土的孔压发展速度增大。

(4)低围压条件下,振动频率对粉土孔压的发展有一定影响,振动频率对粉土孔压发展的影响存在一个临界值,本次研究发现该临界值为频率 0.2 Hz 左右,当振动频率小于该值时,粉土孔压增长速度随频率的增加而减缓;当振动频率大于该值时,粉土孔压增长的速度随频率的增加而增大。

参考文献 (References)

[1] 王树英, 阳军生, LUNA R. 前期动载对低塑性粉土静态和动态强度的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(2): 363-368. [WANG

Shuying, YANG Junsheng, LUNA R. Effect of previous dynamic loading on static and dynamic strengths of low-plasticity silt [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(2): 363-368.]

[2] Seed H B, Martin P P, Lysmer J. The generation and dissipation of pore water pressures during soil liquefaction[R]. Berkeley: University of California, 1975.

[3] Liam Finn W D, Lee K W, Martin G R. An effective stress model for liquefaction [J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1977, 103(6): 517-533.

[4] 谢定义. 土动力学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2011. [XIE Dingyi. Soil Dynamics[M]. Xi'an: Xian Jiaotong University Press, 2011.]

[5] 徐志英, 沈珠江. 地震液化的有效应力二维动力分析方法[J]. 华东水利学院学报, 1981(3): 1-14. [XU Zhiying, SHEN Zhujiang. 2-D dynamic analysis of effective stresses of seismic liquefaction [J]. Journal of East China College of Water Resources, 1981(3): 1-14.]

[6] Martin G R, Seed H B, Liam Finn W D. Fundamentals of liquefaction under cyclic loading [J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 1975, 101(5): 423-438.

[7] 汪闻韶. 土液化特性中的几点发现[J]. 岩土工程学报, 1980, 2(3): 55-63. [WANG Wenshao. Some findings in soil liquefaction [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1980, 2(3): 55-63.]

[8] Finn W D L, Bhatia S K. Endochronic theory of sand liquefaction[C]//Proceedings of the 7th Word Conference on Earthquake Engineering. Turkey: Istanbul, 1980.

[9] Nemat-Nasser S, Shokooh A. A unified approach to densification and liquefaction of cohesionless sand in cyclic shearing [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1979, 16(4): 659-678.

[10] 曹亚林, 何广讷, 林皋. 土中振动孔隙水压力升长程度的能量分析法[J]. 大连工学院学报, 1987, 26(3): 83-89. [CAO Yalin, HE Guangna, LIN Gao. An energy approach for analysing the development of cyclic pore water pressure [J]. Journal of Dalian Institute of Technology, 1987, 26(3): 83-89.]

[11] Ishihara K, Tatsuoka F, Yasuda S. Undrained deformation and liquefaction of sand under cyclic stresses [J]. Soils and Foundations, 1975, 15(1): 29-44.

[12] 谢定义, 张建民. 往返荷载下饱和砂土强度变形瞬态变化的机理[J]. 土木工程学报, 1987(3): 57-70. [XIE Dingyi, ZHANG Jianmin. Developing mechanism on transient strength-deformation of saturated sand under cyclic loading [J]. China Civil Engineering Journal, 1987(3): 57-70.]

- [13] 于濂洪, 王波. 饱和粉土振动孔隙水压力的试验研究[J]. 大连大学学报, 1999, 20(4): 59-62. [YU Lianhong, WANG Bo. Study on pore water pressure of saturated and disturbed sandy loam during cyclic loading [J]. Journal of Dalian University, 1999, 20(4): 59-62.]
- [14] 曾长女, 刘汉龙, 周云东. 饱和粉土粉粒含量影响的孔压发展规律试验研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2006, 26(2): 180-184. [ZENG Changnü, LIU Hanlong, ZHOU Yundong. Experimental study on influence of silt particle content on pore water pressure mode of saturated silt [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2006, 26(2): 180-184.]
- [15] 罗强. 饱和粉土液化孔压增长模型的适用性研究[J]. 人民长江, 2012, 43(7): 59-62. [LUO Qiang. Applicability study on model of pore water pressure increase model of saturated silt liquefaction [J]. Yangtze River, 2012, 43(7): 59-62.]
- [16] 李治朋, 张宇亭, 马希磊, 等. 颗粒组成对粉土动强度的影响分析[J]. 地震工程学报, 2015, 37(2): 500-504. [LI Zhipeng, ZHANG Yuting, MA Xilei, et al. Influence of particle composition on the dynamic strength of silt [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2015, 37(2): 500-504.]
- [17] 丁志宇, 丰士根, 周健, 等. 细粒含量对饱和粉土动力特性影响试验研究[J]. 人民黄河, 2013, 35(3): 138-140. [DING Zhiyu, FENG Tugen, ZHOU Jian, et al. Experimental study of influence of fine particle content on dynamic properties of saturated silty soil [J]. Yellow River, 2013, 35(3): 138-140.]
- [18] 马一雾, 冯艳辉, 王武刚. 淮南地区饱和粉土孔压模型试验与有限元对比分析[J]. 建筑结构, 2017, 47(S1): 1166-1169. [MA Yiji, FENG Yanhui, WANG Wugang. Tri-axial test research and finite element analysis of liquefaction behavior of saturated silt of Huainan Area [J]. Building Structure, 2017, 47(S1): 1166-1169.]
- [19] 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(3): 27-32. [CAO Chenglin, SUN Yongfu, DONG Bin. Study on dynamical intensity features of silt with different clay-particle contents [J]. Coastal Engineering, 2009, 28(3): 27-32.]
- [20] 王海龙, 张宁, 张伟. 山西粉土的动力特性试验研究[J]. 工程勘察, 2010, 38(1): 19-22. [WANG Hailong, ZHANG Ning, ZHANG Wei. Experimental research on dynamic properties of silts in Shanxi [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2010, 38(1): 19-22.]
- [21] 刘茜, 郑西来, 刘红军, 等. 黄河三角洲粉土液化的试验研究[J]. 世界地震工程, 2007, 23(2): 161-166. [LIU Qian, ZHENG Xilai, LIU Hongjun, et al. Experimental studies on liquefaction behavior of silt in the Huanghe River delta [J]. World Earthquake Engineering, 2007, 23(2): 161-166.]
- [22] 杨秀娟, 侯天顺. 黄河三角洲新近沉积土动力学试验研究[J]. 水利水电技术, 2013, 44(12): 82-84. [YANG Xiujian, HOU Tianshun. Experimental study on dynamic behavior of recent sediment soil within Yellow River Delta [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2013, 44(12): 82-84.]
- [23] 孟凡丽, 黄聪, 郑棋. 细粒对杭州饱和粉土动力特性的影响[J]. 浙江工业大学学报, 2016, 44(3): 300-304. [MENG Fanli, HUANG Cong, ZHENG Qi. Influence of fine particles on dynamic characteristics of saturated silt in Hangzhou [J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2016, 44(3): 300-304.]
- [24] Belkhatir M, Arab A, Della N, et al. Laboratory study on the hydraulic conductivity and pore pressure of sand-silt mixtures [J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2014, 32(2): 106-122.
- [25] 中华人民共和国水利部. SL237-1999 土工试验规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999. [Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. SL 237-1999 Specification of Soil Test[S]. Beijing: China Water & Power Press, 1999.]
- [26] 曾长女. 细粒含量对粉土液化特性影响的试验研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2007, 27(4): 478-483. [ZENG Changnü. Experimental Study of the influence of fines content on liquefaction characteristics of silt [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2007, 27(4): 478-483.]
- [27] 姜波, 冯秀丽, 田会, 等. 埕北海域工程地质分区及模糊数学稳定性评价[J]. 海洋科学, 2018, 42(4): 18-27. [JIANG Bo, FENG Xiuli, Tian Donghui, et al. Engineering geological zoning of Chengbei sea area and stability assessment using fuzzy mathematics [J]. Marine Sciences, 2018, 42(4): 18-27.]
- [28] 吴世明. 土动力学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000. [WU Shiming. Soil Dynamics[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2000.]
- [29] 陈国兴, 刘雪珠. 南京粉质黏土与粉砂互层土及粉细砂的振动孔压发展规律研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(1): 79-82. [CHEN Guoxing, LIU Xuezh. Study on dynamic pore water pressure in silty clay interbedded with fine sand of Nanjing [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(1): 79-82.]
- [30] 张建民, 谢定义. 饱和砂土振动孔隙水压力增长的实用算法[J]. 水利学报, 1991(8): 45-51. [ZHANG Jianmin, XIE Dingyi. A practical method for calculating the increase of pore water pressure in saturated sand under vibration [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1991(8): 45-51.]
- [31] 章克凌, 陶振宇. 饱和粘土在循环荷载作用下的孔压预测[J]. 岩土力学, 1994, 15(3): 9-17. [ZHANG Keling, TAO Zhenyu. The prediction of pore pressure of saturated clay under cyclic loading [J]. Rock and Soil Mechanics, 1994, 15(3): 9-17.]
- [32] 叶俊能, 陈斌. 海相沉积软土动强度与孔压特性试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(S1): 55-60. [YE Junneng, CHEN Bin. Dynamic strength and pore pressure property of marine deposit soft clay [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(S1): 55-60.]
- [33] 刘家顺, 张向东, 孙嘉宝, 等. 主应力轴旋转下 K_0 固结饱和粉质黏土孔压及变形特性试验研究[J]. 岩土力学, 2018, 39(8): 2787-2794, 2804. [LIU Jiashu, ZHANG Xiangdong, SUN Jiabao, et al. Experimental study on the pore pressure and deformation of saturated silty clay under K_0 consolidation and principal stress axis rotation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(8): 2787-2794, 2804.]
- [34] 周建, 龚晓南, 李剑强. 循环荷载作用下饱和软粘土特性试验研究[J]. 工业建筑, 2000, 30(11): 43-47, 4. [ZHOU Jian, GONG Xiaonan, LI Jianqiang. Experimental study of saturated soft clay under cyclic loading [J]. Industrial Construction, 2000, 30(11): 43-47, 4.]
- [35] 陈春雷, 王军, 丁光亚. 交通荷载作用下饱和软粘土孔压一应变分析模型[J]. 自然灾害学报, 2009, 18(6): 64-70. [CHEN Chunlei, WANG Jun, DING Guangya. Pore water pressure-residual strain model of soft clay under traffic loading [J]. Journal of Natural

- Disasters, 2009, 18 (6) : 64-70.]
- [36] Matasovic N, Vucetic M. A pore pressure model for cyclic straining of clay [J]. *Soils and Foundations*, 1992, 32 (3) : 156-173.
- [37] Wilson N E, Greenwood J R. Pore pressures and strains after repeated loading of saturated clay [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1974, 11 (2) : 269-277.
- [38] Hyodo M, Yasuhara K, Hirao K. Prediction of clay behaviour in undrained and partially drained cyclic triaxial tests [J]. *Soils and Foundations*, 1992, 32 (4) : 117-127.
- [39] 解新妍. 非等向固结条件下饱和砂土的动强度试验研究[D]. 长安大学硕士学位论文, 2017. [XIE Xinyan. Experimental study on dynamic strength of saturated sand under non - isotropic consolidation[D]. Master Dissertation of Chang'an University, 2017.]
- [40] 牛琪瑛, 裘以惠, 史美筠. 粉土抗液化特性的试验研究[J]. 太原工业大学学报, 1996, 27 (3) : 5-8. [NIU Qiying, QIU Yihui, SHI Meiyun. The study and test of liquefaction resistant characteristics of silt [J]. *Journal of Taiyuan University of Technology*, 1996, 27 (3) : 5-8.]
- [41] 刘雪珠, 陈国兴. 粘粒含量对南京粉细砂液化影响的试验研究[J]. *地震工程与工程振动*, 2003, 23 (3) : 150-155. [LIU Xuezh, CHEN Guoxing. Experimental study on influence of clay Particle content on liquefaction of Nanjing fine sand [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2003, 23 (3) : 150-155.]
- [42] 郝建新, 魏玉峰. 饱和粉土的孔压和液化特性研究[J]. *公路交通科技*, 2005, 22 (11) : 39-41. [HAO Jianxin, WEI Yufeng. Study on pore pressure and liquefaction behavior of saturated silt [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2005, 22 (11) : 39-41.]
- [43] 曾长女, 冯伟娜. 黏粒含量对粉土液化后特性影响的试验研究[J]. *地震工程学报*, 2014, 36 (3) : 727-733. [ZENG Changnü, FENG Weina. Influence of clay content on post-liquefaction characteristics of silt [J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 2014, 36 (3) : 727-733.]