

循环荷载下重塑饱和粉黏土的动—静 强度弱化规律研究

孙睿, 任青, 喻孟初, 颜超

(1. 上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093; 2. 上海建工集团工程研究总院, 上海 201114)

摘要: 选取重塑粉质黏土作为试验土样, 采用室内动静三轴试验系统研究循环荷载作用下土体的动静力学特性, 动静强度的弱化规律, 考虑了围压、频率、固结比、动应力比、循环次数 5 种因素对动静强度的影响。试验结果表明: 承受循环荷载作用后土体与原土体相比总强度可能会增加也可能降低, 剪切时的孔压都会大于原土剪切时孔压。可以统一的是所有承受循环荷载作用后土体有效强度都会降低。通过对强度进行无量纲化处理, 引入了动弹性应变和动弹性孔压, 确定了动弹性应变与有效强度比, 动弹性孔压与有效强度比关系符合指数模型, 并提出来适用于衰减系数与动弹性应变, 衰减系数与动弹性孔压的对数函数模型。

关键词: 动三轴试验; 动静强度; 有效强度; 弱化规律; 循环荷载; 指数模型; 对数模型; 重塑饱和粉黏土
中图分类号: TU43 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-643X(2018)02-0229-07

Study on dynamic static strength degradation of remolded saturated silty clay under cyclic loading

SUN Rui, REN Qing, YU Mengchu, YAN Chao

(1. School of Environment & Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;
2. Engineering General Institute of Shanghai Construction Group, Shanghai 201114, China)

Abstract: In this paper we select restore silty clay as test soil samples, investigate dynamic and static mechanical properties of soil mass under circulating load, and static strength weakening of law by using the indoor static triaxial test system, and take into account the confining pressure, consolidation ratio, frequency and dynamic stress ratio and cyclic number five factors' influence on static strength. The experiment shows that compared with the original soil of soil under cyclic loading total strength may increase or reduce, and the pore pressure at the time of shearing will be larger than the pore pressure at the time of shearing. It can be unified that all effective strength of soil under cyclic loading are reduced. The dynamic elastic strain and dynamic elastic pore pressure are introduced through the dimensionless treatment of strength. The dynamic elastic strain and effective strength ratio are determined. The relationship between dynamic elastic pore pressure and effective strength ratio accords with exponential model, and it is suitable for the attenuation coefficient and elastic strain, attenuation coefficient and the logarithmic function of pore pressure dynamic elastic model.

Key words: dynamic triaxial test; static and dynamic strength; effective strength; degradation law; cyclic loading; index model; logarithmic model; remolded saturated silty clay

1 研究背景

循环荷载是一种最常见的荷载形式, 近年来针对土体在交通荷载, 波浪荷载以及循环荷载作用下

的静力特性, 动力特性, 强度弱化都有大量的研究^[1-5]。针对循环荷载后土体的动静强度存在两种观点, 一: 如果周期荷载使土样产生的动应变或孔压值较小, 给定的应力水平比周期荷载水平至大时, 黏

收稿日期: 2017-07-19; 修回日期: 2017-10-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(51179169、50979097)

作者简介: 孙睿(1991-), 男, 安徽安庆人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为桩土相互作用及土动力学。

土的不排水剪切强度值会保持不变或是稍有所增加^[6]。二: Andersen^[7]通过大量试验认为周期荷载会降低黏土的不排水强度,而降低的程度取决于动荷载下土体的动应变与动孔压的水平。曹勇等^[8]、王淑云等^[9-10]认为土体静不排水抗剪强度取决于周期荷载产生的动应变与超孔压,并通过一系列试验进行无量纲化处理得到了土体的动静强度与超固结比的关系。

黄茂松等^[11]、魏星等^[12]通过大量的室内三轴试验,引入相对偏应力水平描述循环荷载作用下土体的模量弱化特性。郑刚等^[13]针对天津典型粉质黏土做了一系列动、静力三轴试验,得到动应变小于3%时土体的强度基本保持不变,动应变大于3%时强度会弱化,王淑云等^[10]认为振后饱和粉质黏土不排水剪应力路径表现出超固结性质,随着衰减系数的增加,应力路径由正常固结向轻似超固结,再向重似超固结发展。雷华阳等^[14]通过试验证明粉质黏土在交通荷载长期作用下存在一个临界动应力比和一个振动频率门槛值。总体而言针对动静强度的研究仍然比较片面,大部分的研究只是考虑了单一因素,而在实际工程中隧道的长期沉降,地铁的运营期间沉降,道路的路基土体的动静强度弱化都是各种因素的耦合影响。因此本文对于多种因素下土体的动静强度做了进行进一步的研究。

本文针对某海上风电场地区的重塑土粉质黏土进行了动-静强度试验。综合考虑了不同围压,不同频率,不同动应力比,不同固结压力在循环荷载的作用下土体的不排水强度的变化规律。首次用弹性动应变,可恢复孔压来描述土体动静强度的弱化规律,通过综合比较分析各因素对弱化参数的影响。对有效强度进行无量纲化处理,确定了动弹性应变与有效强度比,动弹性孔压与有效强度比关系符合指数模型,并提出来适用于衰减系数与动弹性应变,衰减系数与动弹性孔压的对数函数模型。

2 土样的基本特性与试验方案

本文试验包括静三轴试验和动三轴试验,动三轴试验中考虑围压,偏压固结,动应力幅值,频率等因素的动静强度的弱化趋势。且选取10 000次振动以后做不排水剪切试验。并对1 000次到50 000次的加载次数进行试验既符合短期的加载也包含了长期加载的工程工况。

试验采用的重塑粉质黏土其质量 $\rho = 1.96 \text{ g/cm}^3$,含水率 $\omega = 20\%$,相对密度 $G_s = 2.69$,土试

样均按国家标准制作,试样直径为39.1 mm,高度为80 mm。把制作完成的土试样通过抽真空2 h,再静置24 h。装样以后进行反压饱和,使得土体试样达到95%以上的饱和度。然后在给定的围压下进行24 h固结,固结完成后给土试样施加一定幅值的动荷载达到一定的循环次数以后停止加载。静置一段时间使得孔压达到稳定在进行不排水强度剪切试验。试验计划表1。

表1 试验方案表

围压/ kPa	固结压力/ kPa	频率/ Hz	动应 力比	循环加载 次数
100	1.2	1	0.3	10000
200	1.2	1	0.3	10000
300	1.2	1	0.3	10000
200	1.0	1	0.3	10000
200	1.2	1	0.3	10000
200	1.4	1	0.3	10000
200	1.2	1	0.3	10000
200	1.2	2	0.3	10000
200	1.2	5	0.3	10000
200	1.2	1	0.3	10000
200	1.2	1	0.3	10000
200	1.2	1	0.4	10000
200	1.2	1	0.3	1000
200	1.2	1	0.3	5000
200	1.2	1	0.3	10000
200	1.2	1	0.3	20000
200	1.2	1	0.3	50000

3 试验结果与分析

土体在循环荷载的作用下所产生的应变 $\varepsilon_d = \varepsilon_e + \varepsilon_p$,其中 ε_d 为总应变; ε_e 为回弹的应变; ε_p 为永久应变,见图1。同样孔压随循环次数变化示意图见图2, $U_d = U_e + U_p$,其中 U_d 为最大孔压; U_e 为可恢复孔压, U_p 为永久孔压。

通过对饱和重塑粉黏土在不同的围压进行静三轴和动-静强度试验得到试验规律如图3所示

由图3(a)可得,随着循环次数的增大应变增大并最终趋向于稳定,增长的区间随着围压的增大而扩大,其中当围压100 kPa循环次数达到2 000次时总应变基本趋于稳定,当围压200 kPa循环次数达到10 000次时总应变仍在缓慢的增加,当围压300

kPa 时前 6 000 次内总应变增长都极为显著。

弹性应变 ϵ_e 前几次的加载中急剧增大并最终趋于稳定,同样 ϵ_e 的稳定值随着围压的增大而增大。图 3(b)中体现出动孔压与循环次数变化规律,孔压的变化与应变的变化基本保持一致,但是从图中可以得到可恢复的孔压 U_e 不随围压的增大而增大, U_e 与围压的变化无关。图 3(c)为剪切试验的偏应力与应变关系,100 kPa、200 kPa、300 kPa 3 个不同围压所对应的剪切强度可知承受循环荷载后土体的强度会有明显的降低。图 3(d)为剪切试验的孔压与应变关系,由于初始孔压的存在使得承受循环荷载后土体的不排水剪切的孔压高于原始土样,

并且承受循环加载后的土试样剪切时的孔压曲线会出现峰值点。在不同的固结比(k_c)下对饱和和重塑粉黏土进行静三轴和动-静强度试验得到试验规律如图 4 所示。

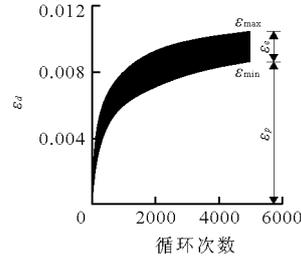


图 1 土体应变示意图

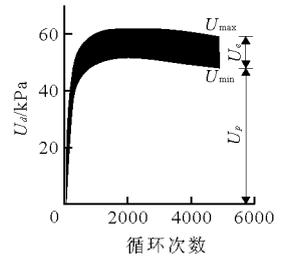


图 2 孔压示意图

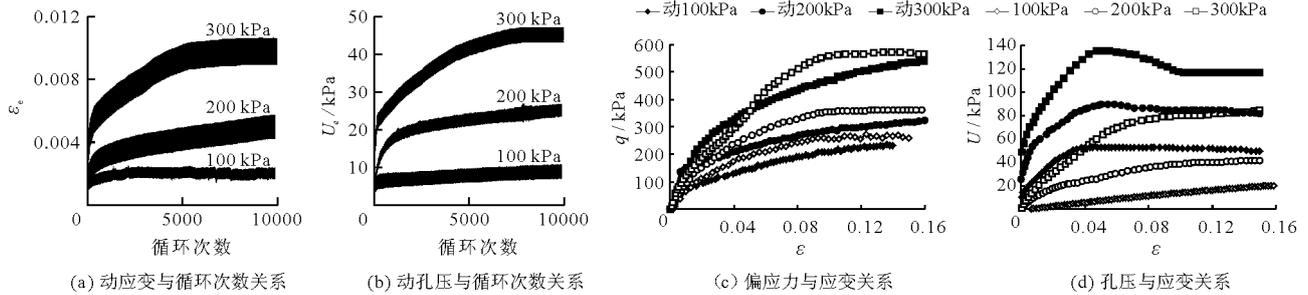


图 3 不同围压下土体的动静应变与动静孔压变化图

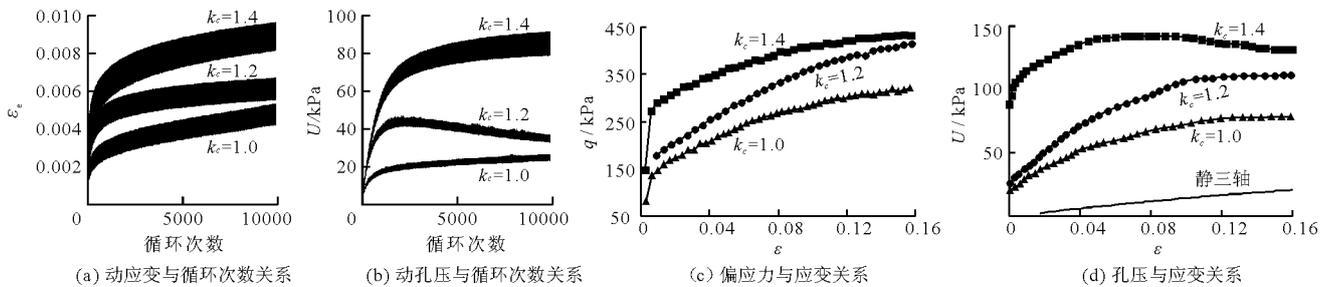


图 4 不同固结比下土体的动静应变与动静孔压变化图

分析图 4(a)可得固结压力越大,总应变与永久应变也越大,在前 1 000 次的循环加载过程中土试样的应变增长最为明显,而固结比对弹性应变影响不明显。图 4(b)中表示孔压与循环次数之间的关系,与应变不同,孔压在前 2 000 次左右的循环次数中增长率较大,固结比对可恢复孔压影响也较大。当孔压达到稳定时, $k_c = 1.4$ 时可恢复孔压 U_e 是 $k_c = 1.0$ 时的 3 倍。图 4(c)、4(d)为 10 000 次的循环加载后的固结不排水剪切(c_u)试验结果。图 4(c)为应力应变关系曲线,可以得到应变较小时偏应力会增长很快,固结比越大土体的强度也就越大并且屈服时应变也就越大。图 4(d)中表示孔压与应变的关系,施加循环荷载后土试样会产生一定孔隙水压力,孔压稳定后再进行不排水剪切试验,由图 4(d)可知,固结比越大初始孔压就越大,由剪切试

验,当 $k_c = 1.4$ 时动三轴试验产生的孔压达到了 88 kPa。 $k_c = 1.2$ 与 $k_c = 1.0$ 时初始孔压分别约为 26 和 20 kPa。循环荷载作用所产生的孔压随固结比的增大而增大,这是由于固结比的增大使得土体试样更加密实。与未受循环荷载作用的土体试样剪切试验比较,承受循环荷载后的试样孔压值更大,且前期的增长速度更快,最终趋于稳定有时会出现峰值。

在不同的动应力比下对饱和和重塑粉黏土进行静三轴和动-静强度试验,得到试验规律如图 5 所示。

图 5(a)、图 5(b)分别为不同动应力比下动应变,孔压与循环次数关系曲线图。在应变和孔压中随着动应变比的增加,应变和孔压增加较大,当达到稳定状态后,不同的动应力比对应的孔压与应变的变化幅度差异较大,这与固结比和围压有着很大的区别。

由图5(a)可看出,随着动应力比的增加,总应变和永久应变会有显著的增加,而对于可恢复应变的影响很小。由图5(b)可看出当动应变比较小弹性孔压不会有大的变化,当动应变比达到0.4时,弹性孔压增长显著。图5(c)是剪切试验的偏应力与应变关系曲线,从试样承受循环荷载后再做剪切试验与未承受循环荷载的试样比较来看,在初期应力增长十分迅速,一直到试样达到屈服时土试样的应力仍在增加,随着应变的增加未承受循环荷载的试样强度会逐渐大于承受循环荷载的试样强度。这呈现出超固结土的性质,因此土体在承受一定次数的循环荷载后可以认为土体是超固结的应力状态。图5(d)为剪切试验的孔压与应变关系曲线,土

试样承受循环荷载后,在剪切的过程中孔压会出现一个峰值,并且峰值随着动应力比的增大而向左移动,初始孔压随着动应力比的增大而增大,与未承受循环荷载的试样相比破坏时孔压呈几何倍数增加。

为了能够比较承受循环荷载的试样的强度,绘制有效应力与应变关系曲线,如图5(e)所示。可以很明显地看出承受循环荷载的试样比未承受循环荷载的试样的有效强度小,虽然循环荷载对土体会有一定的密实作用,根据有效应力原理,承受循环荷载后土体的孔压强度会提高而有效强度会降低,这与Andersen的结论十分吻合。

通过对饱和重塑粉黏土进行不同循环次数的静三轴和动-静强度试验,得到试验规律如图6所示。

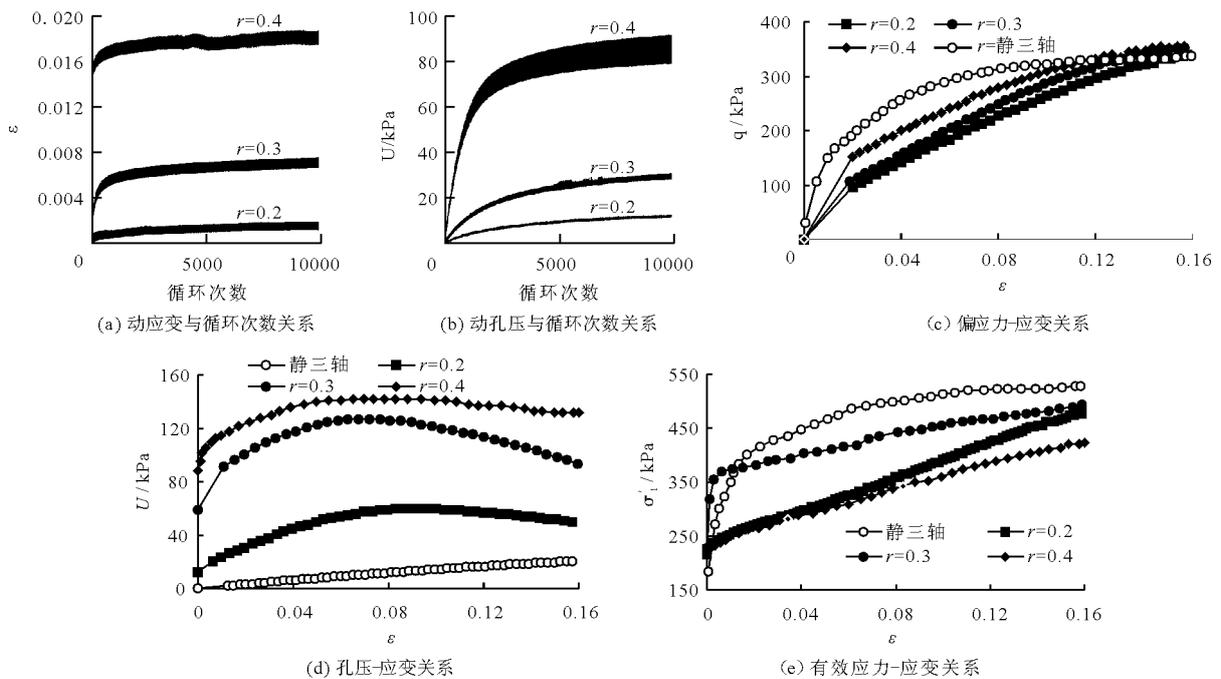


图5 不同动应力比下土体的动静应变与动静孔压变化图

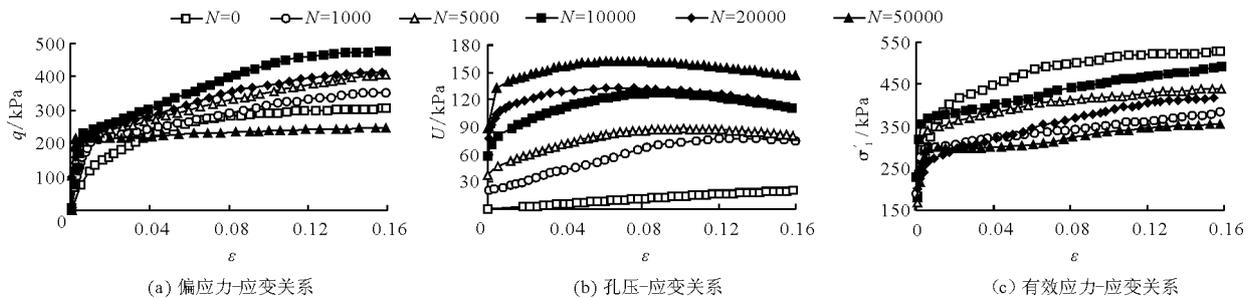


图6 不同循环次数下土体的动静应变与动静孔压变化图

土样承受循环荷载后的静强度与加载的循环次数有很大的关系,土体试样受到循环荷载的作用,土体的总强度会有一些的提高,但并不是加载循环荷载的次数越多越好。本文通过对试样加载多组不同

循环次数动荷载进行不排水剪切试验,探究不同循环次数的加载对土体试样剪切强度的影响,并且与未受循环荷载作用的土试样强度进行比较。图6(a)为剪切试验中多组试验的偏应力与应变关系曲

线。分析可得,承受循环荷载作用的试样都表现出超固结特性,并且循环次数越多超固结土特性越明显。随着循环次数的增加土体的强度逐渐增加,当加载循环荷载 10 000 次时,土体的总强度达到最大值。当加载 20 000 次循环荷载时土体的剪切强度会下降。当加载 50 000 次循环荷载时土体的剪切强度会有一个很明显的降低,其强度甚至低于未承受循环荷载的土试样强度。图 6(b)为剪切试验中多组试验的孔压与应变关系曲线。孔压与应力的规律不同,加载的次数越多,剪切时的初始孔压就越大,且在剪切过程中孔压的发展也呈现出规律性,随着加载循环荷载次数的增加,孔压-应变曲线会出现峰值点,并且峰值点随着加载循环荷载次数的增加向右移动。

加载循环荷载次数作为一个单一因素来分析土体的动静强度。10 000 次的加载时土体的总强度达

到最大值,当达到 50 000 次的加载时土体的总强度会低于未受循环荷载土试样的总强度。因此需更深入的讨论土体受循环荷载后有效强度的变化。图 6(c)为剪切试验的有效应力与应变关系曲线,从有效强度的曲线来看,承受循环荷载后的土试样的有效强度都要低于未承受循环荷载的土体试样。呈现出这种力学性能的主要原因是承受循环荷载后土样有了一个初始孔压,且剪切过程中承受循环荷载后土试样孔压远远大于未承受循环荷载的土试样。而仅仅从有效强度分析,承受循环荷载后土样的强度会有很明显的降低。

本文以上部分考虑了不同循环次数的加载对土体剪切强度的影响,而频率也是影响土体动静强度的一个重要因素。

通过对饱和重塑粉黏土在不同频率下进行静三轴和动-静强度试验得到试验规律如图 7 所示。

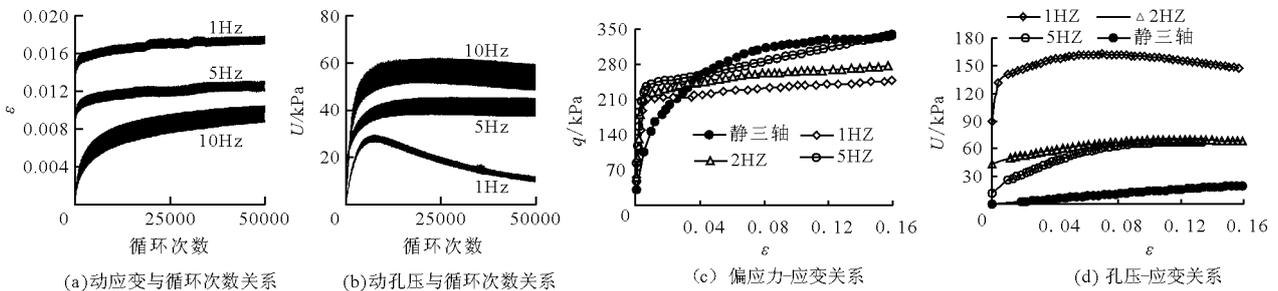


图 7 不同频率下土体的动静应变与动静孔压变化图

大部分文献都只考虑了 10 000 次以下的加载对于土体动静强度的影响。本文选取不同频率对加载 50 000 次后动静强度进行研究。图 7(a)为不同频率下的动应变与循环次数的关系曲线,动应变的发展趋势在前期增长极为迅速最终达到一个稳定状态。而不同频率对应的动应变的变化趋势则呈现出递减的规律,并且频率 10 Hz 与频率 5 Hz 动应变之差要小于频率 5 Hz 与频率 1 Hz 动应变之差。由此可推断大于 10 Hz 以后高频对应的的动应变相差会很小,并且当频率为 10 Hz 时可恢复应变接近 1 Hz 的 2 倍。图 7(b)为不同频率下的动孔压与循环次数的关系曲线,与动应变的规律相反,动孔压随频率的增长出现出递增规律。这主要是振动的频率越大孔隙水压力来不及消散,累计的孔压也就会越大。频率越大对应弹性孔压也就越大。图 7(c)为剪切试验的偏应力与应变关系曲线,可以很明显的看出土体承受循环荷载的作用后表现出超固结土特性,在应变初期应力增长十分迅速。这主要是土体 50 000 次加载以后密实度趋于稳定,可以作为土体

受长期循环荷载后的动强度变化规律。不同频率下加载 50 000 次的循环荷载后土体的动静剪切强度不会出现太大变化。而且从图中可看出所有承受循环荷载作用的土体试样的剪切强度都要低于未承受循环荷载作用的土体试样。图 7(c)为剪切试验的孔压与应变关系曲线,承受循环荷载作用的土体试样的孔压均大于未承受循环荷载作用的土体孔压,这归因于振动后土体产生的永久孔压。也由此可以得出承受不同频率循环荷载土体试样的有效强度远低于未承受循环荷载作用的土体试样。

4 各种因素对于土体动静强度的影响

综上所述,探讨了围压、固结比、动应力比、循环次数和频率 5 种因素对于土体的动静强度以及孔压变化的影响规律。得到循环荷载作用下土体与原土相比总强度可能会增加也可能会小,剪切时的孔压均大于原土剪切时的孔压;所有承受循环荷载作用后土体有效强度都会降低。

本文使用有效强度对试验结果进行分析,对黏土在循环荷载作用下不排水强度取塑性破坏时,应变为 $\varepsilon_1 = 15\%$,而计算 ε_1 有两种方法,第一种是不计入动轴向应变,即不排水剪切开始时 $\varepsilon_1 = 0$;第二种是计入动轴向应变,即初始 $\varepsilon_1 = \varepsilon_d$,试验中在循环荷载作用下,土试样的应变均大于 15% ,本文采用第一种方式计算 ε_1 。当 $\varepsilon_1 = 15\%$ 时取 $\sigma'_{d,cu}/\sigma'_{cu}$ 作为有效强度。不排水剪切时孔压 U 突出先增大后减小的趋势,峰值点的孔压作为最大孔压 U_{ult} ,取破坏时的孔压 U_f 作为破坏孔压。土试样受周期荷载稳定后的弹性应变 $\varepsilon_e = \varepsilon_{dmax} - \varepsilon_{dmin}$,可恢复孔压 $U_e = U_{dmax} - U_{dmin}$ 其中 ε_d 为循环荷载作用下土试样的累计动应变, U_d 为循环荷载作用下土试样的累计孔压,剪切试验后稳定的孔压为 $U_{d,cu}$ 。动应力比为 $\varepsilon_d/\varepsilon_{cu}$;孔压比为 $U_{d,cu}/U_{cu}$ 。在此前的文献中主要是通过研究动应力比与不排水强度以及孔压比与不排水强度之间的函数关系。本文针对可恢复应变、可恢复性孔压与有效强度、衰减系数的关系进行了探讨。

图8为粉黏土的 $\varepsilon_{dmax} - \varepsilon_{dmin}$ 与 $\sigma'_{d,cu}/\sigma'_{cu}$ 的关系,其拟合曲线关系式为:

$$\sigma'_{d,cu}/\sigma'_{cu} = 0.205 (\varepsilon_{dmax} - \varepsilon_{dmin})^{-0.207} \quad (1)$$

由图8可知,在弹性应变较小时,有效强度减小,但是随着动弹性应变的增大,土试样强度的衰减逐渐趋于稳定。

5种因素的比较可以看出,在荷载作用下,循环次数对于有效强度的影响最大,最大的强度衰减可达到30%。动应力比对有效强度比的影响相对较大,并且与拟合曲线有很好的相关性。

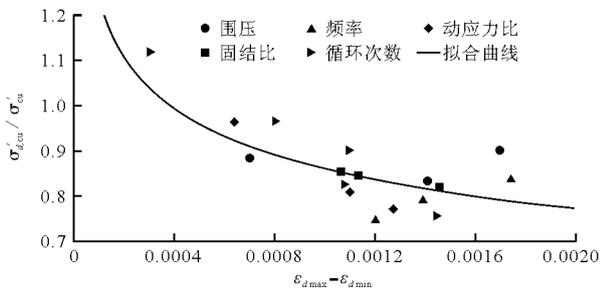


图8 粉黏土的 $\varepsilon_{dmax} - \varepsilon_{dmin}$ 与 $\sigma'_{d,cu}/\sigma'_{cu}$ 关系

图9为粉黏土的 $U_{dmax} - U_{dmin}$ 与 $\sigma'_{d,cu}/\sigma'_{cu}$ 关系,其拟合曲线关系式为:

$$\sigma'_{d,cu}/\sigma'_{cu} = 0.9111 (U_{dmax} - U_{dmin})^{-0.036} \quad (2)$$

与弹性应变相比,弹性孔压与有效强度比的关系更加符合指数函数模型,图9的试验数据点与拟合曲线具有良好的相关性。当弹性孔压较大时,试

验数据点基本都均匀地分布在拟合曲线的两侧。

由图9可以看出,循环次数仍是对有效强度比影响最大的因素,与动弹性应变不同,固结比、动应力比、围压所产生的动弹性孔压都比较大,有效强度的衰减波动范围较大。而频率对有效强度的影响规律性不强。

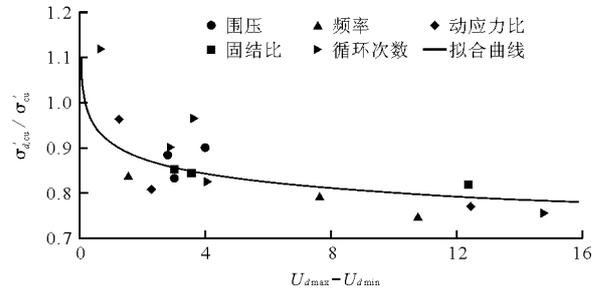


图9 粉黏土的 $U_{dmax} - U_{dmin}$ 与 $\sigma'_{d,cu}/\sigma'_{cu}$ 关系

针对有效强度的衰减作进一步研究分析,定义有效强度折减系数为:

$$\beta = 1 - \sigma'_{d,cu}/\sigma'_{cu} \quad (3)$$

通过定义可知,当有效强度增加时, $\beta > 0$;当有效强度衰减时, $\beta < 0$ 。

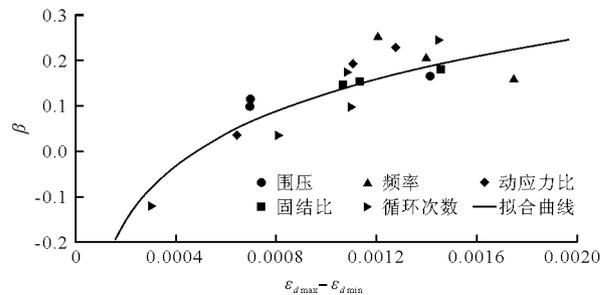


图10 粉黏土的 $\varepsilon_{dmax} - \varepsilon_{dmin}$ 与 β 关系

图10中粉黏土的 $\varepsilon_{dmax} - \varepsilon_{dmin}$ 与 β 关系曲线为:

$$\beta = 0.192 \ln(\varepsilon_{dmax} - \varepsilon_{dmin}) + 1.4569 \quad (4)$$

β 与 $\varepsilon_{dmax} - \varepsilon_{dmin}$ 呈现出对数函数关系,由图10可知,弹性应变与衰减系数呈正相关性, β 会随着 $\varepsilon_{dmax} - \varepsilon_{dmin}$ 的增大最终趋于稳定。

试验数据点中,大多数 $\beta > 0$,即表示土体承受循环荷载后土体的有效强度会衰减,衰减度可以达到30%。

图11中粉黏土的 $U_{dmax} - U_{dmin}$ 与 β 关系曲线为:

$$\beta = 0.0842 \ln(U_{dmax} - U_{dmin}) + 0.026 \quad (5)$$

选用对数模型能够比较好地模拟 β 与 $U_{dmax} - U_{dmin}$ 的关系。与动弹性不同,动弹性孔压与衰减系数曲线的上升阶段更加陡峭,表明初期的动弹性孔压对土体有效强度的衰减更加明显。各种因素的影响与图7中基本一致。

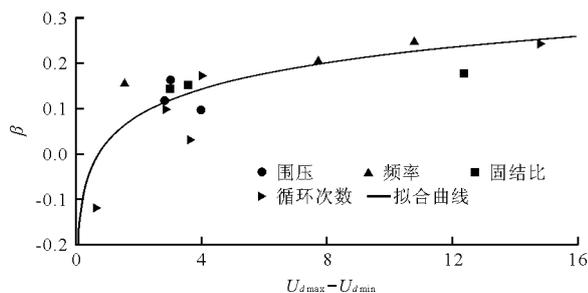


图 11 粉黏土的 $U_{dmax} - U_{dmin}$ 与 β 关系

5 结 论

(1)通过试验得到了围压、频率、动应力比、固结比和循环次数 5 种因素对动应变、动孔压的影响规律。同时对与动荷载作用下土体的可恢复动应变,弹性孔压与循环次数的变化规律进行了分析。

(2)分别探讨以上 5 种因素对与土体动静强度的影响,5 种因素下土体的总强度有时会保持不变甚至会有小幅度的增长,在循环荷载作用下的土体强度较原来都会降低。并且未受循环荷载作用的土体会呈现出超固结土的特性。

(3)5 种因素中,循环次数对土体的动静强度影响最大,动应力比与固结比次之,并且在加载 10 000 次以下循环荷载作用后,土体的不排水剪切强度比未承受循环荷载的土体剪切强度大,10 000 次以后土体的剪切强度会降低,而且在长期循环次数的作用下土体会丧失承载能力。

(4)建立了弹性动应变、弹性动孔压与有效强度的指数模型关系式和弹性动应变、弹性动孔压与衰减系数的对数模型关系式。

参考文献:

[1] BRAY J D, SANCIO R B. Assessment of the liquefaction susceptibility of fine-grained soils[J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 2006, 132(9): 1165 - 1177.

[2] LI Lingling, DAN Hanbo, WANG Lizhong. Undrained behavior of natural marine clay under cyclic loading[J]. Ocean Engineering, 2011, 38(16): 1792 - 1805.

[3] HASHASH Y M A, LEVASSEUR S, OSOULI A, et al. Comparison of two inverse analysis techniques for learning deep excavation response[J]. Computers & Geotechnics, 2010, 37(3): 323 - 333.

[4] ERKEN A, ULKER B M C. Effect of cyclic loading on monotonic shear strength of fine-grained soils[J]. Engineering Geology, 2007, 89(3-4): 243 - 257.

[5] 杜修力, 路德春. 土动力学与岩土地震工程研究进展[J]. 岩土力学, 2011, 32(s2): 10 - 20.

[6] KOUTSOFTAS D C. Effect of cyclic loading on undrained strength of two marine clays[J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 1978, 104(CT5): 609 - 620.

[7] ANDERSEN K H. Behavior of clay subjected to undrained cyclic loading[C] // Proceedings of the International Conference on the Behavior of Off-Shore Structures, BOSS'76. 1976, 1: 392 - 403.

[8] 曹勇, 孔令伟, 杨爱武. 结构性软土动力损伤的刚度弱化特征与强度效应[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(s2): 236 - 240.

[9] 王淑云, 鲁晓兵, 赵京, 等. 粉质黏土周期荷载后的不排水强度衰化特性[C] // 全国水利工程渗流学术研讨会. 2009, 30(10): 2991 - 2995.

[10] 王淑云, 楼志刚. 原状和重塑海洋黏土经历动载后的静强度衰减[J]. 岩土力学, 2000, 21(1): 20 - 23 + 27.

[11] 黄茂松, 李帅. 长期往复荷载作用下近海饱和软黏土强度和刚度的弱化特性[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(10): 1491 - 1498.

[12] 魏星, 黄茂松. 黏土的各向异性界面模型[J]. 水利学报, 2006, 37(7): 831 - 837.

[13] 郑刚, 霍海峰, 雷华阳. 循环荷载后原状与重塑饱和粉质黏土不排水强度性状研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(3): 400 - 408.

[14] 雷华阳, 姜岩, 陆培毅, 等. 交通荷载作用下结构性软土动应力-动应变关系试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(s1): 3052 - 3057.