

文章编号: 1000-7598 (2012) 03-0665-09

两种粉质黏土的动、静强度特性对比研究

黄 博, 史海栋, 凌道盛, 陈云敏

(1. 浙江大学 岩土工程研究所, 杭州 310058; 2. 浙江大学 软弱土与环境土工教育部重点实验室, 杭州 310058)

摘 要: 以京津高铁和杭州地铁沿线的两种典型粉质黏土为研究对象, 并采用英国 GDS 多功能三轴仪完成了静、动力强度测试, 研究了两种土的静力不排水抗剪强度和在交通荷载高振次循环下的动强度、临界动应力比、应变发展模式以及振后抗剪强度等方面的差异。对比发现, 长期循环荷载作用下两种土的应变发展和振后强度均有很大不同。与京津地区粉质黏土相比, 杭州地铁沿线土含水率高、孔隙比大、密度低、灵敏度高、强度低。两种原状土在小幅振动后土体强度略有增大, 而随振幅增大, 振后强度将低于未经历振动时的不排水强度值; 而重塑土振后强度均低于静剪强度。

关 键 词: 交通荷载; 动三轴试验; 扫描电镜; 残余应变; 振后抗剪强度

中图分类号: TU 442

文献标识码: A

Comparisons of static and dynamic behaviors between two silty clays by test

HUANG Bo, SHI Hai-dong, LING Dao-sheng, CHEN Yun-min

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China;

2. Key Laboratory of Soft Soils and Geoenvironmental Engineering, Ministry of Education, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: Basic properties and microstructures of two typical silty clays collected along Beijing-Tianjin high-speed railway and Hangzhou metro line are studied. Using triaxial testing apparatus by GDS Company, static tests under consolidated undrained condition and dynamic tests under high cycles for simulating long-term traffic loading are carried out on these two soils. The undrained static strength, dynamic strength, critical dynamic stress ratio, development of accumulated dynamic strain, and shear strength after vibration of both soils have been studied for comparison. It is found that the soil along the Hangzhou metro line is with high water content, low density, large void ratio, which leads to weak strength and high sensitivity compared with those of Beijing-Tianjin's. After small amplitude cyclic loading, both of the undisturbed specimens behave higher shear strength than that under static condition, while after large amplitude cyclic loading, vice versa. The remolded specimens always show a strength reduction after cyclic loading, no matter the amplitude of dynamic loading.

Key words: traffic loading; dynamic triaxial test; scanning electron microscope; residual strain; shear strength after dynamic loading

1 引 言

随着沿海地区经济高速增长,大量交通项目(机场、高速公路、高速铁路、地铁)都建在沿海地区的地基之上。同时,国内交通量也在不断增大,造成工程病害频发,使用寿命急剧降低^[1-2]。究其原因,是对地基土的差异以及交通荷载作用下地基土工程性质的认识不够。

我国沿海地区分布有广泛而深厚的粉质黏土层,从渤海湾到东南沿海等地区都有大量分

布,属于第四纪地质历史时期冲洪积形成。粉质黏土塑性指数为10~17,压缩性较高,强度差,工程特性接近介于砂土和黏土之间。近年来,国内外学者对粉质黏土进行了一定研究:Chung-Jung Lee等^[3]研究了循环荷载下台北粉质黏土的刚度与阻尼变化规律;凌贤长等^[4]针对哈尔滨和青藏铁路沿线粉质黏土研究冻土的动静强度;唐益群等^[5]结合上海地铁施工中采用的冻结施工法,探索上海粉质黏土冻融前后力学性质及本构关系;陈国兴等^[6]着眼于南京粉质黏土与粉砂互层土抗液化

收稿日期: 2010-12-07

基金项目: 地震行业科研专项(No. 200808022); 国家自然科学基金资助项目(No. 50708095); 国家重点基础研究发展计划(No. 2007CB714200); 国家海洋局第二海洋研究所科研业务费专项基金(JT0803)联合资助。

第一作者简介: 黄博,女,1973年生,博士,副教授,主要从事实验土力学、土动力学方面的教学和科研。E-mail:cehuangbo@zju.edu.cn

通讯作者简介: 凌道盛,男,1968年生,博士,教授,博导,从事土动力学、基础工程和地基处理方面的教学和科研工作。E-mail: dsling@zju.edu.cn

性能。总结文献和本次试验结果，表 1 给出了我国沿海各地粉质黏土的大致分布深度以及基本特性^[7-8]，表中杭州和天津粉质黏土的数据为本次试验结果，其他地区数据是总结文献中提供的数据得到。从表中可以看出，我国各地区粉质黏土物理特性明显不同，这将会影响土体的力学特性。研究我国广泛分布的粉质黏土静、动力性质差异可加强对粉质黏土地基强度、变形作用机制的认识以及探索新的设计方法，具有较强理论和工程应用价

值。

本文试验试样分别取自京-津高铁沿线和杭州地铁 1 号线附近，从这两种土的物理力学特性和微观结构特征比较入手，并且结合实际交通荷载情况采用 GDS 动三轴仪进行了交通荷载下高振次循环荷载试验以及振后抗剪强度试验，对两种土的动力特性、动强度和振后抗剪强度进行了分析。同时也进行了相同密度下重塑试样的力学特性对比，研究两种土的结构性影响。

表 1 各地粉质黏土指标
Table 1 Indices of silty clays

地区	深度范围/m	土粒相对密度	含水率/%	孔隙比 e	液限/%	塑限/%	塑性指数 I_p	压缩系数/ MPa^{-1}
天津	7.0~24.0	2.68~2.70	33.0~43.0	0.92~1.16	41.0~45.0	20.0~24.0	12.0~17.0	0.25~0.40
杭州	9.0~19.0	2.72~2.76	39.8~67.2	1.12~1.88	33.9~53.5	21.2~31.5	12.0~22.0	0.58~1.51
南京			37.0		38.5	22.1	16.4	
上海	20.0~30.0		37.0	1.05	34.0	21.0	13.0	0.72
舟山	17.0~32.0		36.0	1.03	34.0	20.0	14.0	0.65
宁波	12.0~28.0		38.0	1.03	36.0	21.0	15.0	0.72
珠海	2.2~6.0		28.2	0.81	36.6	22.8	13.8	

2 土的基本性质

京-津高铁试验土样取自京津城际高速铁路沿线某勘察路段，取土深度为 5~18 m。杭州地铁试验土样取自杭州地铁 1 号线湘湖站，试验用土深度为 5~15 m。根据两个工程场地的钻孔资料，图 1 给出了两个取土地点的大致土层分布情况。由图可见，两个取土地点都分布有厚达数十米的深厚的粉质黏土层。

两种土基本物理指标见表 1，典型土样的颗粒级配曲线见图 2。从图 2 可见，两种土的最大粒径都小于 0.1 mm，其中黏粒(<0.005 mm)含量都低于 15%，粉粒占了土粒组成的绝大部分。不过两种土的粉粒粒径有较大差距，杭州土主要由较细粉粒(0.01~0.005 mm)组成，而京津土主要由较粗粉粒(0.075~0.01 mm)组成。杭州土的不均匀系数为 1.57，京津土为 2.08。按《建筑地基基础设计规范》^[9]中土的分类，两种土都是级配不良的粉质黏土。

由表 1 可知，京津土密度在 1.79~1.89 g/cm³ 之间，而杭州土密度在 1.60~1.79 g/cm³ 之间。图 3 给出了两种土压缩曲线：杭州土为高压缩性土，而京津土则相对密实，属于中压缩性土，两者初始孔隙比相差很大。综合以上各项指标可见，杭州土的含水率高、密度低、孔隙比大、压缩性高。

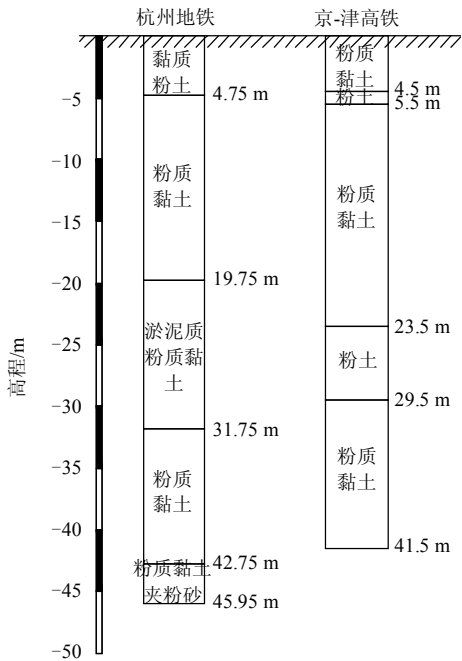


图 1 取土地点土层分布情况
Fig.1 The profile of drill sites

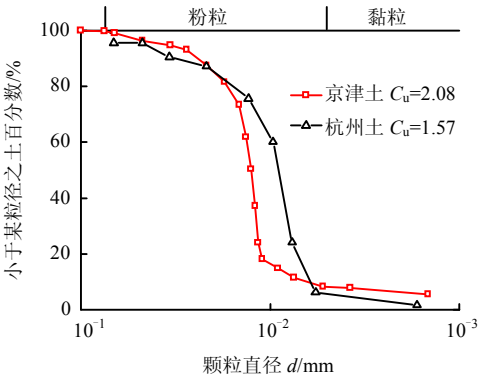
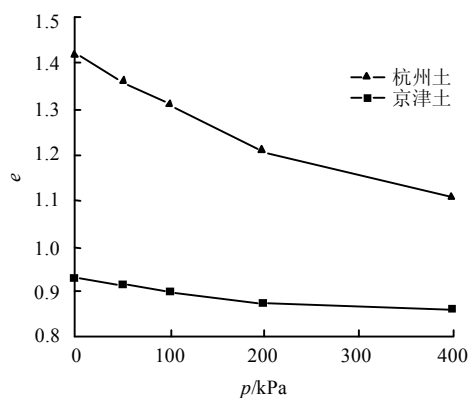


图 2 典型颗粒级配曲线对比
Fig.2 Grain distribution curves of tested soils

图3 典型 $e-p$ 曲线对比Fig.3 Typical $e-p$ curves of tested soils

3 微观结构

土的宏观性状很大程度上受到微观结构的控制。本次试验还用电子显微镜观察两种粉质黏土微观结构,从微观上比较两种土的差异。

试验选取了典型土层进行电镜扫描,其中京津土扫描 15 m 深度处原状样,杭州土扫描 10.5 m 深度处原状样。为了尽量保持土颗粒结构的天然状态,采用真空冷冻升华干燥的方法制备试样。干燥后使用 Philips 公司环境电子显微镜对土样微观结构进行观察。

图 4 为京津土和杭州土的纵向竖直面电镜扫描照片,观察放大倍数分别为 800 倍和 2 000 倍。对比放大 2 000 倍的扫描照片可以发现,杭州土的孔隙不仅多,而且体积较大。从颗粒单元的性状以及大小来看,杭州土的颗粒之间形成片状以及板状的集合体较多,京津土则以单粒结构居多。

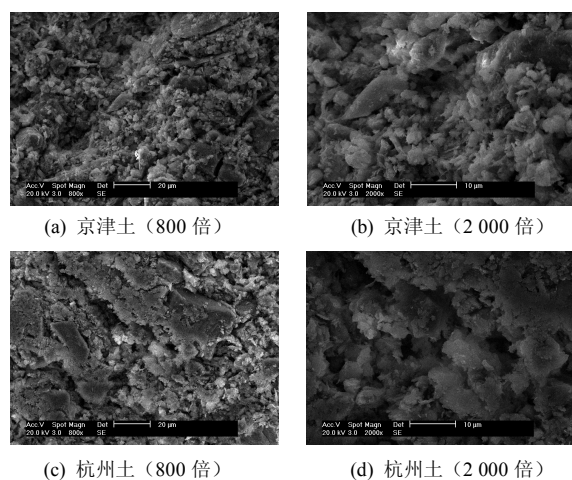


图4 电镜扫描照片

Fig.4 Electron microscope photographs

从微观结构照片对比中可以推测,杭州土的结构性强于京津土。因为杭州土颗粒之间集合体较

多,而且集合体之间有较大的孔隙。这种结构形式决定了土体受扰动后强度会大幅下降的特性。

4 抗剪强度

采用固结不排水三轴试验方法测试土体的静强度。静三轴试验步骤参照《土工试验方法标准》^[10]。原状土用薄壁取土器从两个场地埋深 5~10 m 土层中取出,切削成型,试样高度为 80 mm,直径为 39.1 mm;重塑样取原状土的平均干密度,用干捣法分 5 层装样,京津土干密度取 1.38 g/cm³,杭州土干密度取 1.18 g/cm³。均用真空饱和法饱和,装样完成后,再施加 300 kPa 反压,使试样孔压系数 $B \geq 0.96$ 。试样等向固结,待排水体变基本稳定时固结结束。剪切速率控制在 0.06 mm/min。

每组试验分别在 3 个固结压力下进行剪切试验,试验中杭州土的固结压力分别为 100、150、250 kPa;京津土的固结压力分别为 60、150、200 kPa。

图 5 为 150 kPa 围压下两种土原状和重塑样静三轴试验结果。在不同围压下,各土体试验曲线形状相似,限于篇幅,不一一给出。由图可见,杭州和京津土原状试样的表现大为不同:京津土为应变硬化,杭州土则为应变软化;杭州土试样中的孔压增幅要比京津土高;且京津土强度远高于杭州土。在 150 kPa 围压下,京津原状样主应力差峰值为 178 kPa,杭州土原状样为 95.7 kPa。

两种土的重塑样均表现为应变硬化。京津重塑土除强度有一定降低外,其响应与原状样几乎没有差异。而杭州重塑土应力-应变曲线与原状土完全不同,不仅从应变软化转变为应变硬化,且原状样峰值强度对应应变为 3%,重塑样则剪切至 22%轴向应变仍未出现峰值。这说明扰动对杭州土影响较大,会引起土体变形特性发生很大改变。对比唐益群等^[5]、吴刚等^[11]等试验结果发现,长江中下游地区粉质黏土力学指标差异较大,抗剪强度差距可达 2 倍左右。

表 2 给出了静三轴试验测得的两种土原状及重塑样总应力强度指标 c 、 ϕ 以及有效应力强度指标 c' 、 ϕ' 。破坏标准取主应力差峰值,若无峰值则取 15%应变对应强度。原状样组数较多,且试样因深度、密度不一,因而强度指标在一定范围内变化。

杭州重塑土黏聚力降低为 11.4 kPa,相比原状样降低 23.5%~47.9%。可见重塑后改变了颗粒间的微观结构,破坏了结构的联结作用,导致黏聚力下降。而京津重塑土黏聚力较原状样没有降低,说明重塑对土颗粒间的联结作用影响较小。这结果证实

了前文中的扫描电镜观察中的推测,说明杭州土在扰动后特别是重塑后黏聚力会有较大地下降,而对京津土影响较小。

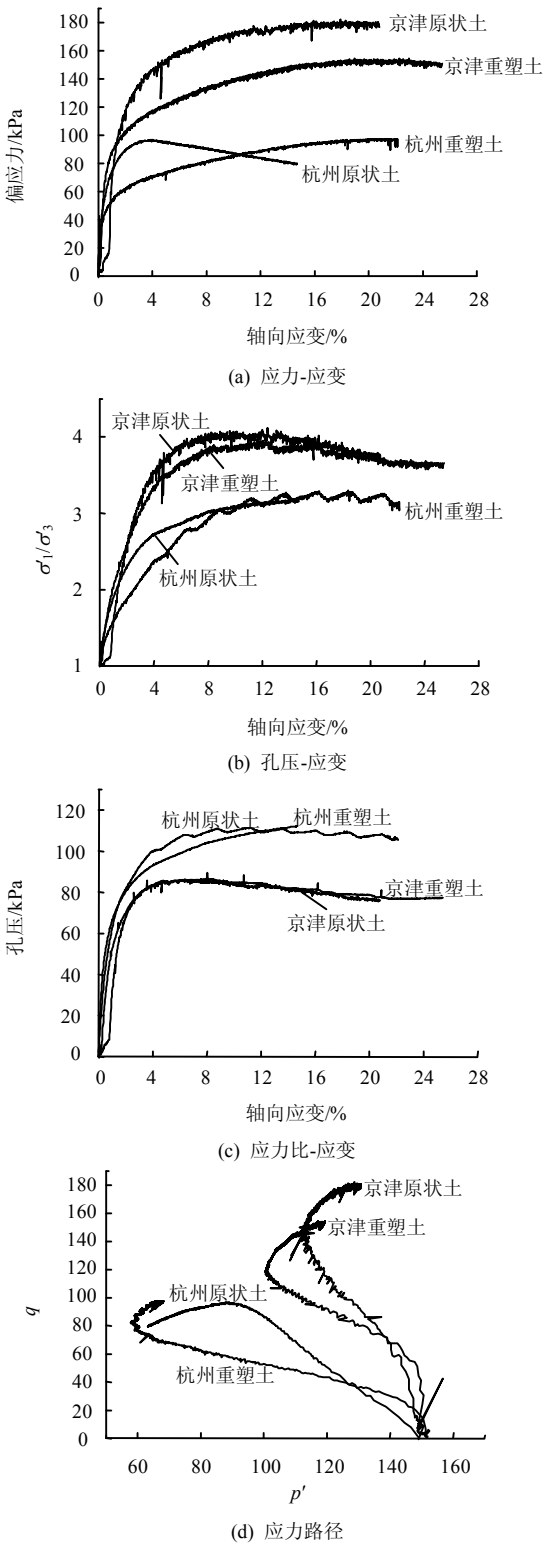


图5 原状和重塑京津、杭州粉质黏土静三轴试验结果
Fig.5 CU test results of undisturbed and remolded samples

由此可见,处理长江中下游地区的深厚软土地基时要特别注意土的结构性影响,减少对土体的扰

动。而在北方地区的粉质黏土地基,灵敏度低,扰动的影响会相对较弱。

表2 固结不排水抗剪强度指标对比
Table2 Comparison of consolidated undrained shear strength parameters

抗剪强度指标	c/kPa	$\varphi/(\text{^\circ})$	c'/kPa	$\varphi'/(\text{^\circ})$
京津土	17.6~21.9	17.2~19.4	4.1~15.7	29.5~31.9
杭州土	14.9~22.9	8.7~13.8	4.5~6.9	21.0~29.3
京津重塑土	22.6	14.0	8.5	32.0
杭州重塑土	11.4	9.9	3.0	25.6

5 动力特性

5.1 试验方法及动力荷载

本次动力试验采用 GDS 公司的双向振动动三轴系统。试样尺寸与前文中静三轴试验相同,固结压力均为 80 kPa。

由于本文所研究的两种土在实际工况中均要承受长期交通荷载作用,因此,在动力试验中,动荷载模拟高铁运行荷载,排水条件设定为不排水,在极限状态下研究地基土在交通荷载作用下的动力特性。在动应力比的选取上,选取了较大的动应力比,为了在动力试验中使土体发生破坏,研究土体动强度。

本次试验荷载波形采用京津高速铁路相应数据,进行列车-钢轨-板式轨道-路基和地基系统进行整体耦合振动分析,模拟得到的竖直方向动应力形式,如图 6 所示。方法详见文献[12]。通过前人的研究发现^[13-14],地铁运行过程中地基土所受动力荷载波形也与图 6 所示波形相似。因此认为,可以用图 6 所示波形来大致模拟地铁运行过程中的动力荷载,所以本次试验中对杭州地铁沿线的粉质黏土也使用上述波形加载。

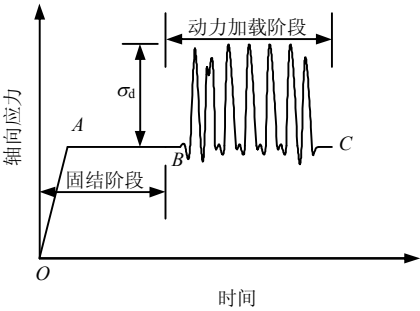


图6 模拟交通荷载波形
Fig.6 Simulated traffic loading in the test

5.2 动力试验结果与分析

5.2.1 变形特性

图 7 给出了不排水条件下两种土累积应变(循

环荷载中产生的塑性应变为累积应变)随振次的变化关系。从图中可见,在较小的动应力下,试样的累积应变会慢慢趋向稳定;在较大的动应力下,则可能发生应变的突然增大而导致破坏。如:京津土在动应力比 0.5(动应力定义为: $CSR = \sigma_d / 2\sigma_3$, σ_d 如图 6 所示, $\sigma_3 = 80$ kPa)作用下,前 30 000 次振动后应变仅为 2%,但是在后面的振动中应变迅速发展,最终达到 10%以上。可见,粉质黏土在长期交通荷载作用下,若排水条件不畅,会产生很大的工后沉降。在这两种应变发展模式之间,存在一临界动应力比,这一概念的提出可参见文献[15],即动应力比小于临界动应力比,变形最终趋于稳定;若动应力比超过临界动应力比,土体变形会急剧增大,并最终超过工程许可。因此可以推论,要控制铁路地基长期沉降可以采取两种方法:一是提高地基土临界动应力比;二是降低交通荷载产生的动应力。

5.2.2 动强度

国内外许多学者对饱和粉质黏土动力荷载下的特性做了研究。但对其破坏标准取值方面国内外还没有形成共识。其中有变形标准(1%、3%、5%、10%等^[16-17]);屈服标准(陈颖平等^[18]提出了用累积应变转折点的方法来判定应变);孔压标准(动荷载引起的残余孔压达到极限平衡时的孔压或达到起始液化时的孔压^[19-20])等。在粉质黏土动力破坏判别标准上,主要是采用应变判别标准。即在一定振次下达到认为破坏的目标应变所需要的动应力幅值。从动强度的定义可以看出,选取不同的动强度破坏标准动强度也就不同。

表 3 给出了京津、杭州两地粉质黏土的原状和重塑试样动三轴试验情况汇总表。表 3 中振次是本次试验中两种土的原状以及重塑试样在各种动应力比的交通荷载下达到 3%应变所需要的振次情况。表中“未达到”是表示试样在 110 000 次交通荷载

作用后应变仍小于 3%。

Boulanger 和 Idriss^[21]认为,黏性土在应变达到 3%时会产生破坏, Lee 等^[22]学者在研究中也发现,高灵敏性黏土和低灵敏性黏土在应变分别达到 2%~3%和 4%~6%时会形成剪切破坏面,之后土体将产生大变形。且从静三轴试验应力-应变关系曲线来看,杭州土在应变达到 3%时强度达到峰值。而一般路基是以强度控制设计,而对于高速铁路以及城市轨道交通工程等项目,变形控制是路基工程设计的主要控制因素。因为在强度破坏前,可能已出现了不容许的过大变形。因此,拟选取瞬时应变达到 3%为破坏标准。

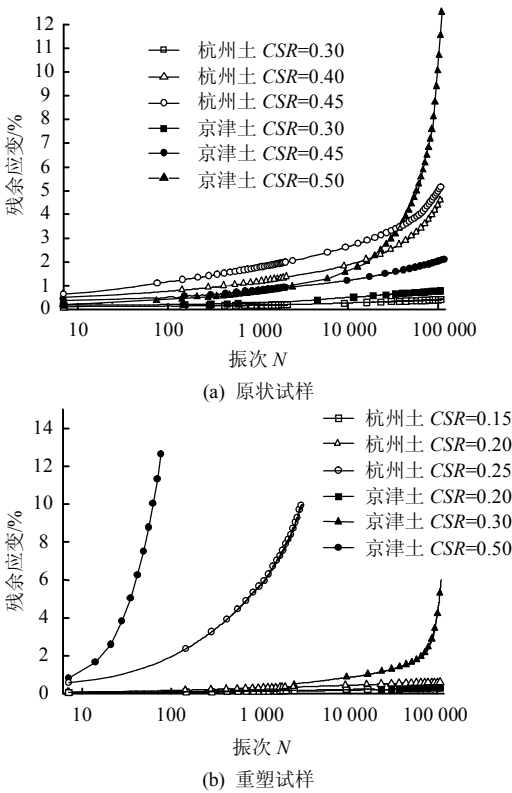


图 7 不排水条件下试样累积应变随振次的变化关系
Fig.7 Relationships between accumulated strain and vibration number in undrained condition

表 3 动三轴试验汇总
Table3 Summary of dynamic triaxial tests

土类	序号	初始孔隙比	密度/(g/cm ³)	动应力比	最终加载振次	最大累积应变/%	是否破坏	振次 $\varepsilon_{DA}=3\%$
京津原状土	1	0.9	1.89	0.3	111 307	0.78	否	未达到
京津原状土	2	0.92	1.88	0.45	122 157	2.13	否	未达到
京津原状土	3	0.94	1.86	0.5	111 657	12.7	是	30 807
京津重塑土	4	0.95	1.85	0.2	110 000	0.29	否	未达到
京津重塑土	5	0.95	1.85	0.3	110 000	6.01	是	88 557
京津重塑土	6	0.95	1.85	0.5	77	12.6	是	30
杭州原状土	7	1.48	1.69	0.3	110 000	0.41	否	未达到
杭州原状土	8	1.48	1.69	0.4	91 357	4.69	是	20 308
杭州原状土	9	1.48	1.69	0.45	11 200	5.22	是	1 839
杭州重塑土	10	1.25	1.75	0.15	20 000	0.24	否	未达到
杭州重塑土	11	1.25	1.75	0.2	110 000	0.59	否	未达到
杭州重塑土	12	1.25	1.75	0.25	2 968	9.97	是	238

图8为根据表3数据绘出的动强度曲线,表中未破坏的试样假设在这个动应力条件下破坏振次无穷大;结合图7对比发现,原状京津土动强度高于杭州土。两种重塑土动强度都比原状样有所下降,然而杭州土重塑后的动强度下降更为明显,其临界动应力比大约在0.20~0.25,只有原状土的50%左右。而京津重塑土的临界动应力比在0.3左右,大约相当于原状土的70%,明显高于杭州土。

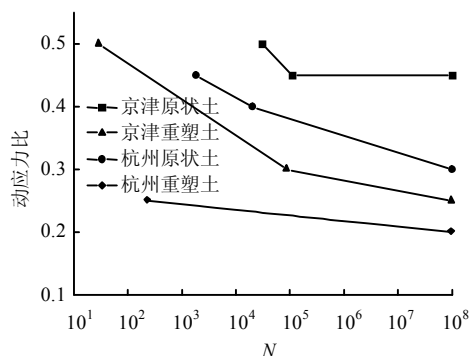


图8 动强度曲线

Fig.8 Dynamic strength curves

6 振后抗剪强度

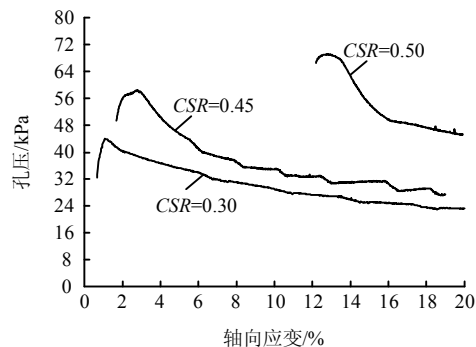
由于低路堤高速公路和铁路的软土地基会在长期交通荷载作用发生软化,导致地基承载力降低,影响工程安全正常使用。因此,本文也对京津土和杭州土在循环荷载作用后抗剪强度变化规律进行了研究。振动结束后,立即进行不排水剪试验。

图9~12给出了两种粉质黏土振后静力剪切过程中应力-应变发展、孔压发展以及应力路径等。静力剪切试验中的应变计算仍设试样初始高度8cm为基础,并在动力试验产生的应变和孔压基础上进行的,因此,应变和孔压的初值不为0。

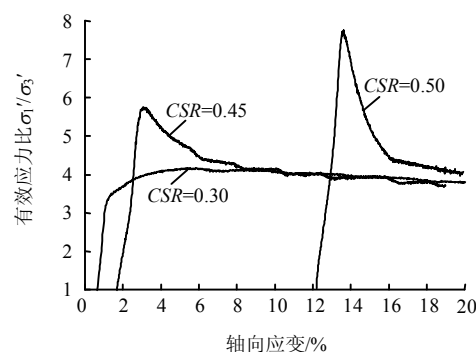
表4是两种土原状和重塑试样的振后有效应力抗剪强度指标。表中 u_0 表示振动后产生的残余孔压。动应力比为0的情况即试样的静三轴抗剪强度。振后 c' 、 ϕ' 值的计算中破坏标准同静三轴剪切试验。从两种原状土以及重塑土的振后强度研究中可以发现,振后试样抗剪强度随着循环荷载动应力比的增大而减小。这是由于在较大动力荷载作用后,孔压上升也较大,导致有效围压减小,抗剪强度降低。原状土样有受到小幅振动后使强度升高的现象。这种较小振幅的长期往复振动作用,类似于预剪作用^[23](prestraining)。对重塑试样,则不存在该现象。

从原状土的振后黏聚力来看,京津土的振后黏聚力值有一定提高,杭州土则比振前减小。两种土

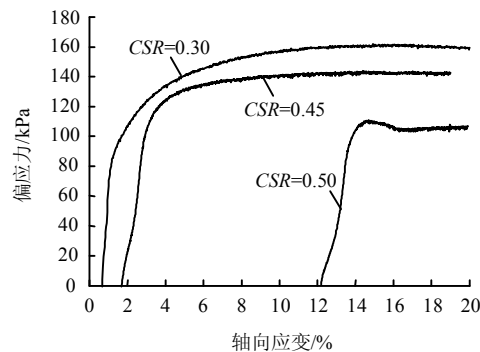
的振后 ϕ' 值比原状土都有一定增长。重塑土的振后 c' 、 ϕ' 值比振前有所下降。



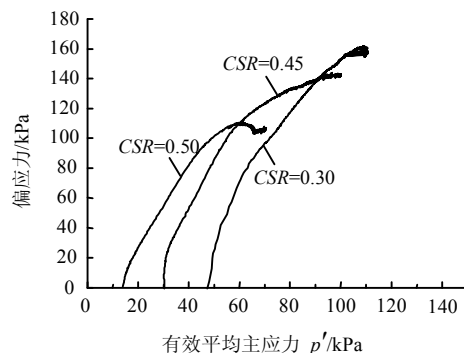
(a) 应变-孔压曲线



(b) 应变-有效应力比曲线



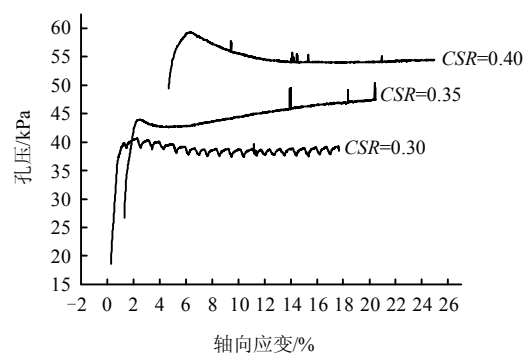
(c) 应变-偏应力曲线



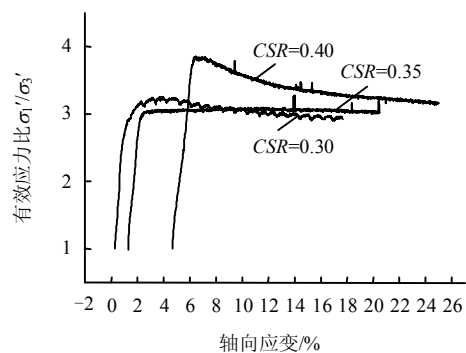
(d) 应力路径

图9 京津原状土振后三轴试验

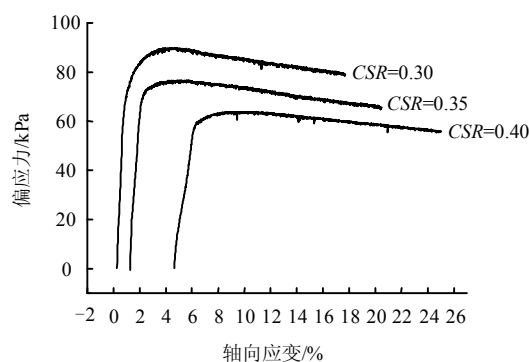
Fig.9 Standard triaxial tests after cyclic loading for undisturbed Beijing-Tianjin soil



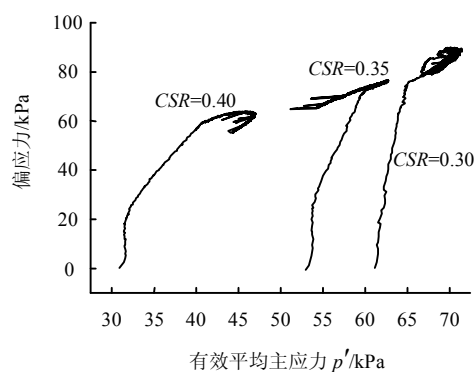
(a) 应变-孔压曲线



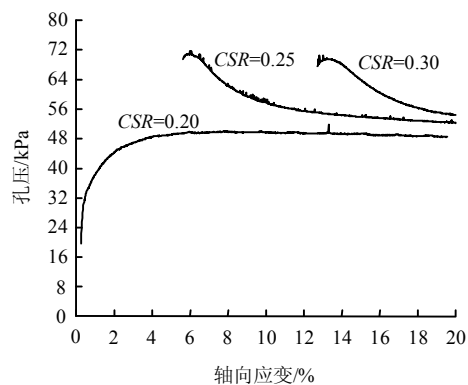
(b) 应变-有效应力比曲线



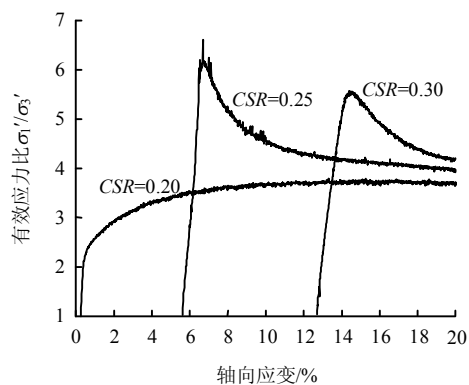
(c) 应变-偏应力曲线



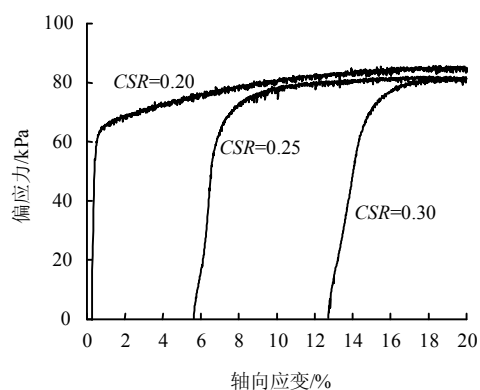
(d) 应力路径



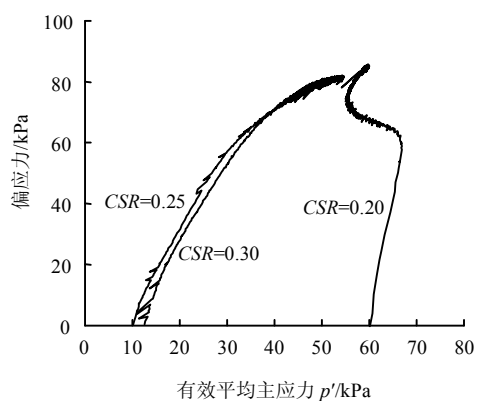
(a) 应变-孔压曲线



(b) 应变-有效应力比曲线



(c) 应变-偏应力曲线



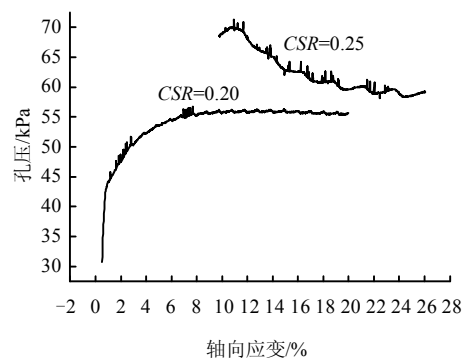
(d) 应力路径

图 10 杭州原状土振后三轴试验

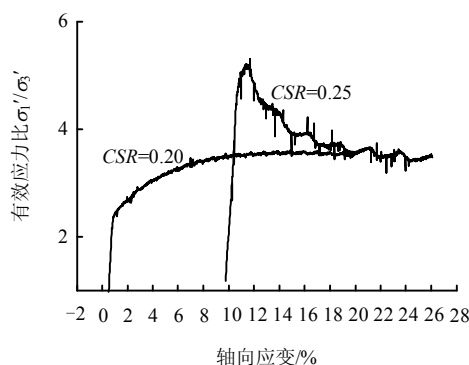
Fig.10 Standard triaxial tests after cyclic loading for undisturbed Hangzhou soil

图 11 京津重塑土振后三轴试验

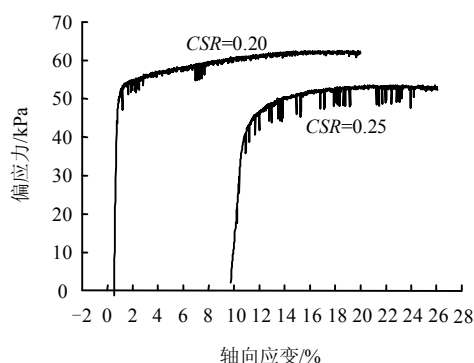
Fig.11 Standard triaxial tests after cyclic loading for remoulded Beijing-Tianjin soil



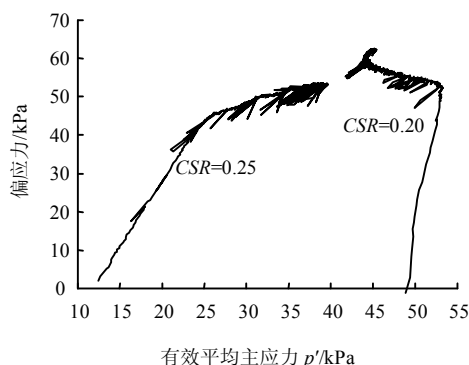
(a) 应变-孔压曲线



(b) 应变-有效应力比曲线



(c) 应变-偏应力曲线



(d) 应力路径

图 12 杭州重塑土振后三轴试验

Fig.12 Standard triaxial tests after cyclic loading for remoulded Hangzhou soil

表 4 振后抗剪强度

Table 4 Shear strength after dynamic loading

试样类别	动应力比	$(\sigma_1 - \sigma_3)_t$ /kPa	u_0 /kPa	振后 c' /kPa	振后 φ' /(°)
京津原状土	0.00	126.59			
	0.30	161.40	31.80		
	0.45	143.70	44.70	19.5	27.8
	0.50	111.00	65.30		
杭州原状土	0.00	73.00~88.13			
	0.30	89.90	19.33		
	0.35	76.61	26.64	6.6	26.7
	0.45	63.84	49.37		
京津重塑土	0.00	108.91			
	0.20	84.40	17.80		
	0.30	81.00	65.70	20.4	18.3
	0.50	70.80	73.00		
杭州重塑土	0.00	60.34			
	0.20	61.86	30.27	10.7	22.4
	0.25	53.05	55.43		

7 结 论

(1) 与京津土相比, 杭州土有含水率高、孔隙比大、压缩性高、强度低的特点。动、静强度都明显低于京津土。

(2) 微观结构反映出杭州土颗粒间聚合较多且聚合颗粒之间有较大孔隙; 而京津土以单粒结构为主, 且孔隙较小。因此, 杭州土灵敏度较京津土高。

(3) 长期交通荷载作用下, 减少动应力或增大地基土的临界动应力比可使地基土的应变发展过程更快地趋于稳定。

(4) 粉质黏土在承受较大交通荷载且排水不畅时应变可能会持续发展, 出现应变过大的情况。

(5) 小幅振动后, 土样强度变化很小或有一定增大, 而随着振幅增大振动后强度会发生衰减。重塑土的振后强度均低于未经历振动时的不排水强度值。

参 考 文 献

- [1] SAKAI A, SAMANG L, MIURA N. Partially-drained cyclic behavior and its application to the settlement of a low embankment road on silty-clay[J]. *Soils and Foundations*, 2003, 43(1): 33—46.
- [2] 王常品, 姬美秀, 陈云敏. 列车荷载下饱和软黏土地基的附加沉降[C]//中国土木工程学会第九届土力学及岩土工程学术会议论文集. 北京: 清华大学出版社, 2003: 1118—1122.
- [3] LEE Chung-jung, SHEU Sheau-feng. The stiffness degradation and damping ratio evolution of Taipei silty clay under cyclic straining[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2007, 27(8): 730—740.

- [4] 凌贤长, 徐学燕, 邱明国, 等. 冻结哈尔滨粉质黏土动三轴试验 CT 检测研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 24(8): 1244—1249.
LING Xian-zhang, XU Xue-yan, QIU Ming-guo, et al. Study of CT scanning of Harbin frozen silty clay before and after dynamic triaxial test[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, 24(8): 1244—1249.
- [5] 唐益群, 沈锋, 胡向东, 等. 上海地区冻融后暗绿色粉质黏土动本构关系与微结构研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(11): 1249—1252.
TANG Yi-qun, SHEN Feng, HU Xiang-dong, et al. Study of dynamic constitutive relation and microstructure of melted dark green silty soil in Shanghai[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2005, 27(11): 1249—1252.
- [6] 陈国兴, 刘学珠, 庄海洋. 南京粉质黏土与粉砂互层土及粉细砂的抗液化性能试验研究[J]. 防灾与减灾工程学报, 2003, 23(2): 28—34.
CHEN Guo-xing, LIU Xue-zhu, ZHUANG Hai-yang. Experimental study of liquefaction resistant characteristics of silty clay with fine sand interbed and fine sand in Nanjing[J]. **Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering**, 2003, 23(2): 28—34.
- [7] 王丽霞, 徐庆立, 凌贤长, 等. 青藏铁路重塑冻结粉质黏土动剪切模量试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2007, 27(2): 177—180.
WANG Li-xia, XU Qing-li, LING Xian-zhang, et al. Experimental study of dynamic shear modulus of remolded frozen silty clay for Qinghai-Tibet Railway[J]. **Earthquake Engineering and Engineering Vibration**, 2007, 27(2): 177—180.
- [8] 魏汝龙. 软黏土的强度和变形[M]. 北京: 人民交通出版社, 1987.
- [9] 中华人民共和国建设部. GB 50007—2002 建筑地基基础设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- [10] 中华人民共和国水利部. GB/T 50123—1999 土工试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 1999.
- [11] 吴刚, 陈锦剑, 杨建军, 等. 上海暗绿色粉质黏土力学特性的试验与理论研究[J]. 地质与勘探, 2003, 39(增刊): 119—122.
WU Gang, CHEN Jin-jian, YANG Jian-jun, et al. Theoretical and experimental study of mechanical characteristics of dark green silty clay in Shanghai[J]. **Geology and Prospecting**, 2003, 39(Supp.): 119—122.
- [12] 陈云敏, 边学成. 高速交通引起的振动和沉降[C]//第七届全国土动力学学术会议论文集. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- [13] 张曦, 唐益群, 周念清, 等. 地铁振动荷载作用下隧道周围饱和软黏土动力响应研究[J]. 土木工程学报, 2007, 40(2): 86—88.
ZHANG Xi, TANG Yi-qun, ZHOU Nian-qing, et al. Dynamic response of saturated soft clay around a subway tunnel under vibration load[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2007, 40(2): 86—88.
- [14] 吴祥松, 朱合华, 袁海平. 列车激震荷载下地铁双圆隧道的动力响应研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(增刊 2): 1059—1068.
WU Xiang-song, ZHU He-hua, YUAN Hai-ping. Research on dynamic response to vibration loads caused by train for double circular tunnel[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(Supp.2): 1059—1068.
- [15] 王常晶, 陈云敏. 交通荷载引起的静偏应力对饱和软黏土不排水循环性状影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(11): 1742—1747.
WANG Chang-jin, CHEN Yun-min. Study of effect of traffic loading induced static deviator stress on undrained cyclic properties of saturated soft clay[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2007, 29(11): 1742—1747.
- [16] HYODO M, YASUHARA K, HIRAO K. Prediction of clay behavior in undrained and partially drained cyclic triaxial tests[J]. **Soils and Foundations**, 1992, 32(4): 117—127.
- [17] HYODO M, HYDE A F L, YAMAMOTO Y, et al. Cyclic shear strength of undisturbed and remolded marine clays[J]. **Soils and Foundations**, 1999, 39(2): 45—48.
- [18] 陈颖平, 黄博, 陈云敏. 循环荷载作用下结构性软黏土的变形和强度特性[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(9): 1065—1071.
CHEN Ying-ping, HUANG Bo, CHEN Yun-min. Deformation and strength of structural soft clay under cyclic loading[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2005, 27(9): 1065—1071.
- [19] SEED H B. Soil liquefaction and cyclic mobility evaluation for level ground during earthquakes[J]. **Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE**, 1979, 105(GT2): 201—255.
- [20] 赵成刚, 尤昌龙. 饱和砂土液化与稳态强度[J]. 土木工程学报, 2001, 34(3): 90—96.
ZHAO Cheng-gang, YOU Chang-long. Liquefaction and steady state strength[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2001, 34(3): 90—96.
- [21] BOULANGER R W, IDRIS I M. Evaluating the potential for liquefaction or cyclic failure of silts and clays[R]. California, USA: Department of Civil & Environmental Engineering, College of Engineering, University of California at Davis, 2004.
- [22] LEE K L. Cyclic strength of a sensitive clay of eastern Canada[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1979, 16(1): 163—176.
- [23] WICHTMANN T, TRIANTAFYLIDIS Th. The Influence of a cyclic and dynamic loading history on dynamic properties of dry sand, part I: Cyclic and dynamic torsional prestraining[J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 2004, 24(2): 127—147.