

董正方,王仁辉,曹献伟,等.黄泛区粉砂土动强度与抗液化强度试验研究[J].地震工程学报,2021,43(1):162-168.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2021.01.162
DONG Zhengfang, WANG Renhui, CAO Xianwei, et al. Experimental Study of Dynamic and Anti-Liquefaction Strengths of Silty Sand in Yellow River Flood Area[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2021, 43(1): 162-168. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2021.01.162

黄泛区粉砂土动强度与抗液化强度试验研究

董正方^{1,2}, 王仁辉¹, 曹献伟¹, 张群生¹

(1. 河南大学 岩土与轨道交通工程研究所, 河南 开封 475004;

2. 河南大学 河南省轨道交通智能建造工程技术中心, 河南 开封 475004)

摘要: 因黄泛区粉砂土与其他地区有较大区别,对其动强度和抗液化强度的研究相对较少。对开封地区粉砂土的动强度和抗液化强度进行研究,选定围压、干密度、细粒含量作为影响因素,通过动三轴试验得到其动强度曲线和抗液化强度曲线,分别分析三个影响因素对黄泛区粉砂土动强度和抗液化强度的影响。结果表明:黄泛区粉砂土的动强度和抗液化强度随围压和干密度的增加而增大,随动荷载振动次数的增加而减小,随细粒含量的增加出现先降低后提高的现象,且其抗液化强度比动强度大。

关键词: 岩土动力学; 粉砂土; 动三轴试验; 动强度; 抗液化强度

中图分类号: TU435

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2021)01-0162-08

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2021.01.162

Experimental Study of Dynamic and Anti-Liquefaction Strengths of Silty Sand in Yellow River Flood Area

DONG Zhengfang^{1,2}, WANG Renhui¹, CAO Xianwei¹, ZHANG Qunsheng¹

(1. Institute of Geotechnical and Rail Transport Engineering, Henan University, Kaifeng 475004, Henan, China;

2. Henan Provincial Research Center of Engineering on Intelligent Construction
of Rail Transit, Henan University, Kaifeng 475004, Henan, China)

Abstract: The silty sand in the Yellow River flood area differs from that in other areas. In this study, we investigated the dynamic and anti-liquefaction strengths of silty sand in the Kaifeng area and identified three influence factors: the confining pressure, dry density, and fines content. Based on the results of a dynamic triaxial test, we obtained the dynamic strength and anti-liquefaction strength curves of silty sand in the Yellow River flood area and considered the effects of these three influence factors. The experimental results indicated that the dynamic and anti-liquefaction strengths of silty sand in the Yellow River flood area increase with increases in the confining pressure and dry density, decrease with increases in the vibration time of the dynamic

收稿日期: 2019-08-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(51408195, 51608174); 河南省高等学校重点科研项目资助计划(19A560008); 河南省高等学校青年骨干教师培养计划(2018GGJS018); 河南省科技攻关计划(192102310279); 开封市科技发展计划项目(1603110)

第一作者简介: 董正方(1980—), 男, 河南滑县人, 博士, 硕士生导师, 副教授, 主要从事城市轨道交通结构抗震。

E-mail: carmanhouse@126.com。

load, and first decrease and then increase with increases in the fines content. The anti-liquefaction strength of the silty sand was determined to be greater than its dynamic strength in this area.

Keywords: geotechnical dynamics; silty sand; dynamic triaxial test; dynamic strength; anti-liquefaction strength

0 引言

黄河在历史上多次改道,产生了大范围的黄泛区。黄泛区有大量粉砂土,这类土比较松散、颗粒均匀,相互之间的咬合作用较差,黏粒含量较低,在地震和车辆振动等荷载下极易发生破坏甚至液化,对地基造成严重破坏,不利于城市的建设。所以对黄泛区粉砂土进行动强度和抗液化强度试验研究是很有必要的。

目前已经有很多学者对土体的动强度和抗液化强度进行了研究。粉土方面:吴波等^[1]利用动三轴仪对非饱和粉土进行动强度试验,分析了饱和度、动应力比及固结围压对非饱和粉土动强度特性和液化特性的影响。张艳美等^[2]利用动三轴试验研究了有效围压、动荷载和粉粒含量等因素对饱和粉质土液化特性的影响。周正龙等^[3]利用 GDS 空心圆柱仪进行了一系列循环扭剪试验研究饱和粉土的液化特性。张焕强等^[4]利用 FLAC^{3D} 软件开展了高地震烈度区粉土地基抗液化研究。

砂土方面:陈宇龙等^[5]利用空心圆柱扭剪仪对含非塑性细粒的饱和砂土进行单调加载和循环扭剪试验,研究了不同细粒含量饱和砂土液化特性。杨瑞雪等^[6]研究了黏性土对细砂土抗液化性能的改善作用。韩华强等^[7]通过动三轴试验分析了砂土和水泥胶凝砂土在不同应力条件下的动力变形特性及抗液化特性。李博等^[8]借助 CKC 循环动三轴仪,开展饱和和不排水条件下掺有橡胶粉末的砂土试样的动力学特性研究,重点评估掺入的橡胶粉末对试样抗液化性能的影响。王忠涛等^[9]通过不排水条件下的循环主应力轴旋转试验,分析了轴向偏差应力和剪应力的幅值及初始相位差对饱和砂土动强度的影响。Mehmet 等^[10]通过三轴压缩试验得出,当细粒土含量为 0~20% 且砂粒与细粒的平均粒径很小时,干净砂土的液化敏感性随细粒含量的增加而增大。

粉砂土方面:赵丽敏等^[11]以河南开封地区粉砂土为研究对象研究其静力特性。来淑娜^[12]通过对饱和粉砂土进行动强度试验,分析了荷载频率、固结

比以及围压对粉砂土动强度的影响。孟凡丽等^[13]以杭州典型粉砂土为研究对象进行固结不排水动三轴试验,研究了不同围压、频率和固结比条件下的循环荷载对杭州粉砂土动孔压增长的影响,分析了不同频率、不同固结比、不同围压作用下杭州粉砂土的孔隙水压力变化规律。

综上所述,土体的动强度和抗液化强度研究主要集中在砂土和粉土,对于粉砂土的研究相对较少。本文拟通过动三轴试验,研究不同围压、干密度、细粒含量对黄泛区粉砂土动强度和抗液化强度的影响。

1 试验介绍

1.1 试验仪器

本次试验仪器采用英国 GDS 公司研制的 GDS5Hz/10kPa 双向振动三轴仪。该动三轴仪采用高速直流伺服马达施加动荷载,根据水下荷载传感器和位移传感器的反馈对荷载和变形大小进行控制,结合 GDSLAB 软件、围压控制器、反压控制器以及数据采集器完成围压和反压的控制以及整个试验过程数据的采集。

GDS 动三轴仪包括:制动单元、外压力室、平衡器、围压控制器、反压控制器、高速数据采集和控制单元。该仪器适用于直径 39.1、50、70、100 mm 的试样,动态加载频率范围是 0~5 Hz,动态轴压可加载 ±10 kN,精度为满量程的 0.1%。位移量程为 100 mm,位移分辨率为 0.208 mm,轴向位移精确度为满量程的 0.07%。以上均可满足试验要求。

1.2 试样制备

试验所用土样为黄泛区粉砂土,采用重塑土(图 1),其基本物理指标列于表 1,颗粒级配曲线见图 2。试验采用直径 39.1 mm、高度 80 mm 的重塑土试样。根据控制细粒含量 20%、35% 和 45%,干密度 1.55、1.60 和 1.63 g/cm³,含水率 16.0% 进行试样制备。

取 1 kg 扰动烘干土,按目标干密度和细粒含量计算和制备一组土样。以控制含水率 16%、细粒含量 35%、干密度 1.6 g/cm³ 为例,具体数据列于表 2。



图 1 扰动粉砂土
Fig.1 Disturbed silty sand

表 1 黄泛区粉砂土物理力学性能

Table 1 Physical and mechanical properties of silty sand in the Yellow River flood area

液限 /%	塑限 /%	塑性指数	最大干密度 /(g·cm ⁻³)	最优含水率 /%
25	18	7	1.90	16

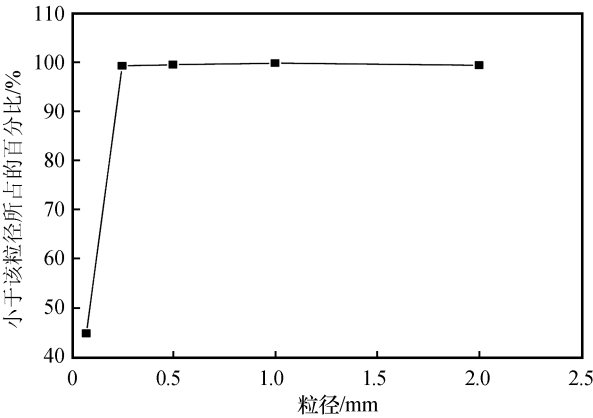


图 2 土样颗粒级配曲线
Fig.2 Particle grading curve of soil sample

表 2 试样各组分重量

Table 2 Weight of sample components

组成成分	总干土重/kg	含水率/%	水/kg	细粒含量/%	细粒土/kg	试样目标重/g
质量	1.00	16.00	0.16	35.00	0.35	157.79

用天平称取对应质量的细粒土和水,其中细粒土(粒径小于 0.075 mm)由烘干扰动土在土体筛分机上振筛 20 min 得到,制备试样所需细粒土质量由总土质量乘以细粒含量计算得出;然后将土和水在容器里搅拌均匀,盖上湿布,并静置 12 h;取静置后的土样进行两个位置的含水率检测,并与目标含水

率进行比较,误差小于 2%;最后取静置后的土样,按试样目标重量用天平称取相应质量的土样,用土样击实器分三层击实,每层击实后要刨毛。制备成型的试样如图 3 所示。



图 3 成型土样
Fig.3 Produced soil sample

本文选取开封地区黄泛区粉砂土为研究对象,主要考虑围压、细粒含量和干密度对粉砂土动强度和抗液化强度的影响。每个影响因素设置 3 个水平,具体信息列于表 3。

表 3 动强度和抗液化强度影响因素及其水平

Table 3 Influencing factors and associated level of dynamic strength and anti-liquefaction strength

因素	水平		
	1	2	3
围压/kPa	50	100	150
细粒含量/%	20	35	45
干密度/(g·cm ⁻³)	1.55	1.60	1.63

进行粉砂土动强度和抗液化强度试验时,每个影响因素的 3 个水平均参与试验,共设置 27 个工况。试验时,动荷载加载频率为 0.5 Hz,每个工况至少设置 3 个试件。

1.3 试验方法

将制备好的试样安装到动三轴底座上,通过动三轴仪对试样进行反压饱和。当孔隙水压力系数达到 0.95 以上时,认为试样的饱和度已满足要求。接下来进入固结阶段,当试样的反压体积平稳变化或轴向应变保持 5 min 不变时,认为试样固结完成。对固结完成的试样施加一定动荷载幅值 σ_1 的正弦波(图 4),当试样振动 N_1 周达到液化破坏标准时停止试验并修改数据储存的名称,破坏后的试样见图 5。对相同条件下的第二个试样用另一个动荷载

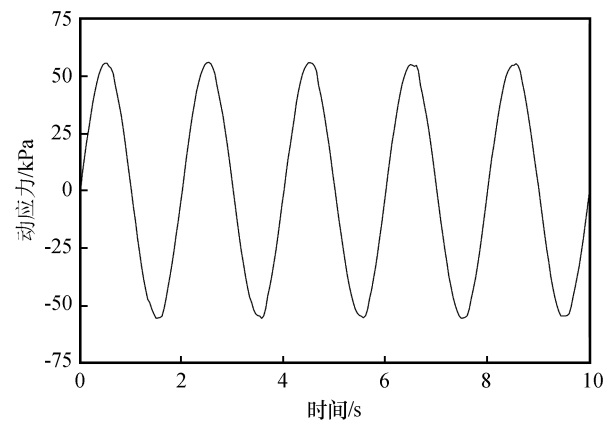


图 4 施加的动荷载

Fig.4 Applied dynamic loads

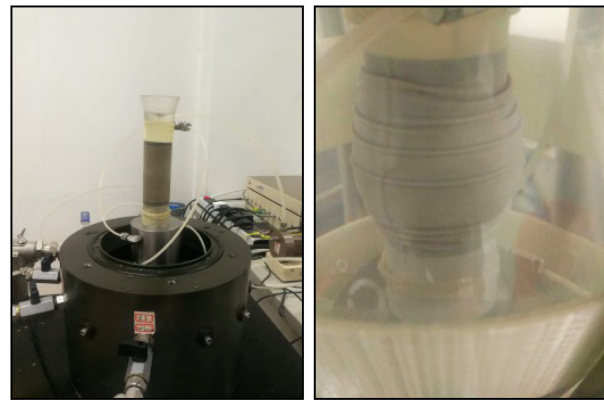


图 5 土样破坏前后对比

Fig.5 Comparison of soil samples before and after failure

幅值 σ_2 的正弦波进行试验, 得到破坏周数 N_2 。使用同样的方法对第三个试样施加动荷载幅值 σ_3 的

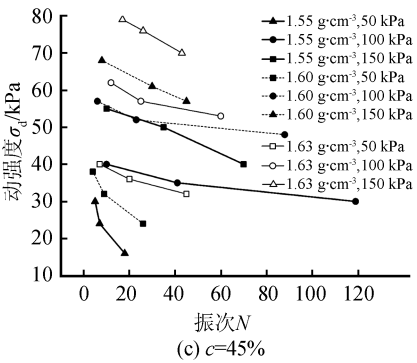
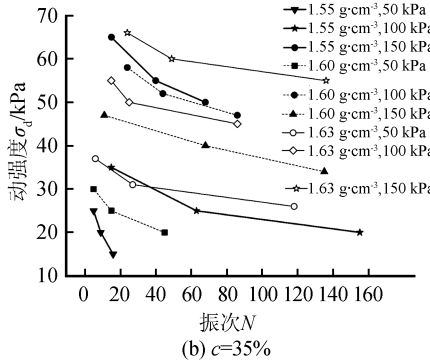
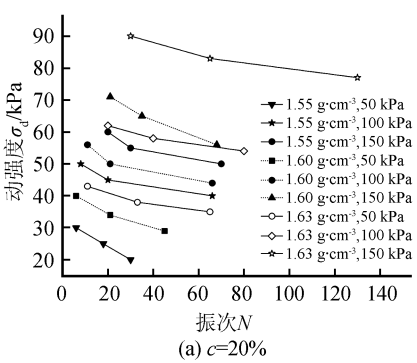


图 6 不同围压下动强度曲线

Fig.6 Dynamic strength curves under different confining pressure

中可以看出, 围压对黄泛区粉砂土动强度的影响较大, 且规律很明显, 即在其他条件一定时, 围压较大时动强度曲线始终位于上方, 随着围压的减小动强度曲线依次降低, 但动强度并不是随着围压的增减呈等间距增减的变化趋势。围压是用来模拟土体的埋深, 不同埋深土体的密实度不同, 抗剪强度也不

正弦波, 得到破坏周数 N_3 。用三个试样的数据资料可以得出动应力与破坏周数的变化曲线, 即 σ_d-N_f 曲线。当破坏标准为动强度破坏标准时, σ_d-N_f 曲线为动强度曲线; 当破坏标准为抗液化强度破坏标准时, σ_d-N_f 曲线为抗液化强度曲线。

1.4 破坏标准

根据文献[14], 选用试样受循环动荷载时首次出现孔隙水压力增值达到初始固结围压作为土体抗液化强度的破坏标准, 选用试样受循环动荷载时双幅轴向应变达到 5% 作为土体动强度破坏标准。

2 结果分析

张艳美等^[2]选用有效围压、动荷载和粉粒含量作为影响因素研究其对饱和粉质土液化特性的影响。来淑娜^[12]选用荷载频率、固结比以及围压作为影响因素研究其对粉砂土的动强度的影响。Martin^[15]选用细粒含量和干密度作为影响因素。基于此, 本次试验研究围压、细粒含量和干密度对黄泛区粉砂土动强度和抗液化强度的影响, 设置了 50、100 和 150 kPa 三个围压, 20%、35% 和 45% 三个细粒含量, 以及 1.55、1.60 和 1.63 g/cm³ 三个干密度。

2.1 围压对粉砂土动强度和抗液化强度的影响

保证干密度和细粒含量不变, 分析围压对黄泛区粉砂土动强度和抗液化强度的影响。试验结果如图 6、图 7 所示。

图 6 是试件在不同围压下的动强度曲线。从图

同, 埋深越大土体的抗剪能力就越强, 试验数据结果符合该规律。这是因为随着围压即埋深的增加, 粉砂土颗粒之间的间隙越来越小, 颗粒之间接触越来越密实, 颗粒之间的黏结力也越来越大, 抗剪能力就会提高, 所以围压越大粉砂土的动强度越大。但由于粉砂土颗粒成分等因素的影响, 颗粒之间的密实

度并不是随围压的增减出现成比例增减,这就导致其抗剪能力并不是随围压增减出现等比例增减的趋

势,通过试验反映出来就是动强度并不是随围压的增减而成比例增减。

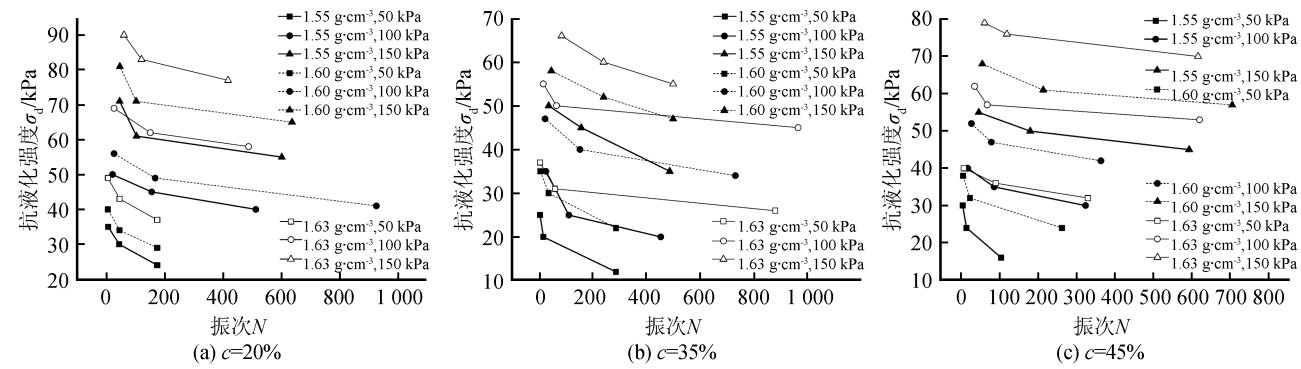


图 7 不同围压下抗液化强度曲线

Fig.7 Anti-liquefaction strength curves under different confining pressure

图 7 是试件在不同围压下的抗液化强度曲线。可以看出,抗液化强度曲线和动强度曲线有类似的变化规律,只是达到相应破坏标准时的动应力不同。粉砂土达到抗液化强度破坏标准时的动应力随围压的增加而增大,但动应力并不随围压呈现等间距增加趋势。动三轴试验测得粉砂土的抗液化强度随围压的增加而增大,这是因为随着围压的增加,土体受

到挤压增大,土体颗粒间的空隙越来越小,相应的饱和和土的孔隙水压力就越越来越小,土体的抗液化能力会得到提高,故抗液化强度会增大。

2.2 干密度对粉砂土动强度和抗液化强度的影响

保证围压和细粒含量不变,分析干密度对黄泛区粉砂土动强度和抗液化强度的影响。实验结果如图 8、图 9 所示。

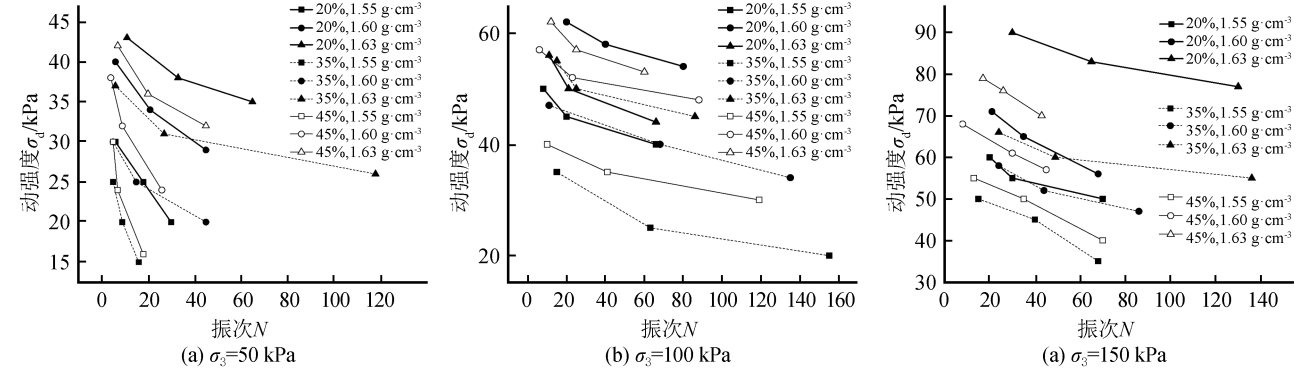


图 8 不同干密度下动强度曲线

Fig.8 Dynamic strength curves under different dry density

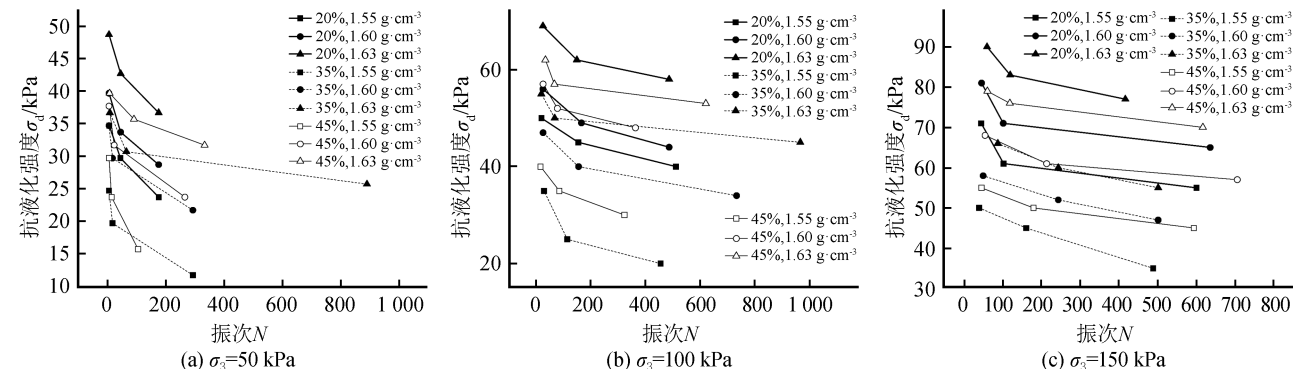


图 9 不同干密度下抗液化强度曲线

Fig.9 Anti-liquefaction strength curves under different dry density

图 8 是试样在不同干密度下的动强度曲线。从图中可以看出,在其他条件相同时,黄泛区粉砂土的动强度随干密度的增加而增大,随动荷载振动次数的增加而减小。干密度模拟土体的密实度,干密度越大土体越密实,土颗粒之间的作用力就越强,达到动强度破坏标准所需的动应力就越大,故动强度随干密度的增加而增大。

图 9 是试样在不同干密度下的抗液化强度曲线。从图中可以看出,在其他条件相同时,黄泛区粉砂土的抗液化强度随干密度的增加而增大,随动荷

载振动次数的增加而减小。因为随着干密度的增加土体的密实度相应提升,土体颗粒间的空隙越来越小,孔隙水压力也越来越小,土体颗粒间就越不容易发生相对错动,土体的抗液化能力会得到提高,故抗液化强度随干密度的增加而增大。

2.3 细粒含量对粉砂土动强度和抗液化强度的影响

保证干密度和围压不变,分析细粒含量对黄泛区粉砂土动强度和抗液化强度的影响。实验结果如图 10、图 11 所示。

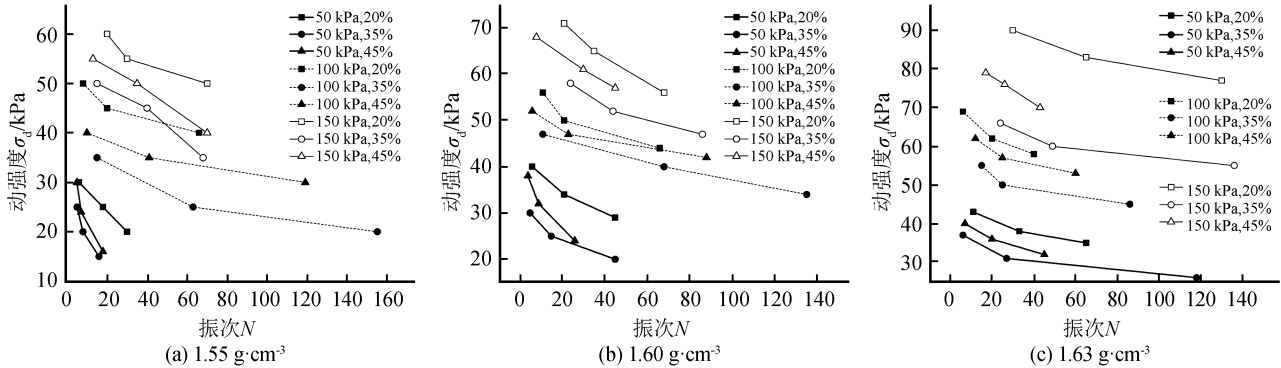


图 10 不同细粒含量下动强度曲线

Fig.10 Dynamic strength curves under different fines content

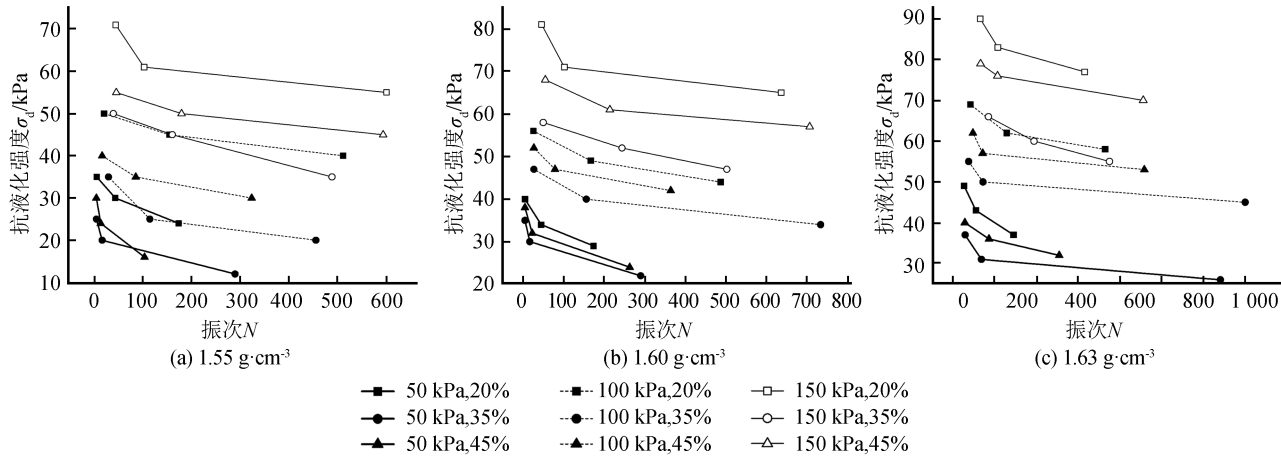


图 11 不同细粒含量下抗液化强度曲线

Fig.11 Anti-liquefaction strength curves under different fines content

图 10 是试件在不同细粒含量下的动强度曲线。从图中可以看出,在其他条件相同时,黄泛区粉砂土的动强度并不是随细粒含量的变化呈单调变化,而是当细粒含量达到一定量时动强度达到最低点。本次试验中,细粒含量达到 35% 时粉砂土表现出动强度最低,且动强度随动荷载振动次数的增加出现减小的趋势。当粉砂土的细粒含量小于 35% 时,细粒在土体结构中起到润滑的作用,且润滑作用会随细

粒含量的增加而增大,此时土体的动强度随之降低;细粒含量超过 35% 后,细粒土之间的连接作用慢慢变强,其润滑作用慢慢消失,细粒土开始阻碍土体颗粒的相互错动,粉砂土的动强度也随之加强。

图 11 是试件在不同细粒含量下的抗液化强度曲线。从图中可以看出,黄泛区粉砂土的抗液化强度曲线和动强度曲线有相同的变化规律,即在其他条件相同时,抗液化强度并不是随细粒含量的变化

呈单调变化,而是当细粒含量达到一定量时粉砂土的抗液化强度达到最低点。在本次试验中,细粒含量达到 35% 时粉砂土表现出抗液化强度最低,且抗液化强度随动荷载振动次数的增加出现减小的趋势。粉砂土的细粒含量小于 35% 时,细粒在土体结构中起到润滑的作用,在动荷载作用下土体颗粒更容易发生相对错动,且润滑作用会随细粒含量的增加而增大,此时土体的抗液化强度也随之降低;而细粒含量超过 35% 后,土颗粒之间的黏结力变强,不易发生相对错动,粉砂土的抗液化强度也随之加强。

对于粉砂土的抗液化强度试验,范基春^[16]和杨举朋^[17]分别研究了干密度和细粒含量以及干密度和围压对粉砂土抗液化强度的影响,发现抗液化强度随干密度和围压的增加而增大,随细粒含量的增加先减小后增大,且当细粒含量为 40% 时抗液化强度最低。本次试验得到的围压、干密度和细粒含量对黄泛区粉砂土抗液化强度的影响规律与之相似,但范基春发现当细粒含量为 40% 时粉砂土的抗液化强度最低,而本试验得到的细粒含量为 35%。初步分析是由于不同地区粉砂土的结构成分不同,比如黏粒含量不同、造成抗液化强度最小时细粒含量不一样,具体原因还有待进一步研究。

3 结 论

通过动三轴试验,研究了围压、干密度、细粒含量对黄泛区粉砂土动强度和抗液化强度的影响,得出如下结论:

(1) 黄泛区粉砂土的动强度和抗液化强度均随围压和干密度的增加而增大。

(2) 黄泛区粉砂土的动强度和抗液化强度均随细粒含量的增加出现先降低后增加的变化趋势,且细粒含量为 35% 时动强度和抗液化强度最小。

(3) 动荷载振动次数随动强度和抗液化强度的减小而增加。

(4) 黄泛区粉砂土抗液化强度比动强度大说明粉砂土双幅轴向应变达到 5% 后仍具有一定承载能力。

参考文献(References)

- [1] 吴波,孙德安.非饱和粉土的液化特性研究[J].岩土力学,2013,34(2):411-416.
WU Bo, SUN Dean. Study of Liquefaction Characteristics of Unsaturated Silt[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(2):

411-416.

- [2] 张艳美,程志良,万丽丽,等.黄河三角洲饱和粉质土液化性能试验研究[J].工程地质学报,2018,26(2):451-458.
ZHANG Yanmei, CHENG Zhiliang, WAN Lili, et al. Experimental Study on Liquefaction Characteristics of Saturated Silty Soil at Yellow River Delta[J]. Journal of Engineering Geology, 2018, 26(2):451-458.
- [3] 周正龙,陈国兴,吴琪.初始剪应力对饱和粉土液化特性影响试验研究[J].岩土工程学报,2016,38(3):504-509.
ZHOU Zhenglong, CHEN Guoxing, WU Qi. Effect of Initial Static Shear Stress on Liquefaction Behavior of Saturated Silt[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(3): 504-509.
- [4] 张焕强,向晓辉.高地震烈度区粉土地基抗液化及隧道抗震研究[J].地下空间与工程学报,2017,13(增刊1):332-338.
ZHANG Huanqiang, XIANG Xiaohui. Anti Liquefaction of Silty Soil Foundation and Seismic Performance of Tunnel in High Earthquake Intensity Area[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2017, 13(Suppl):332-338.
- [5] 陈宇龙,张宇宁.非塑性细粒对饱和砂土液化特性影响的试验研究[J].岩土力学,2016,37(2):507-516.
CHEN Yulong, ZHANG Yuning. Experimental Study of Effects of Non-plastic Fines on Liquefaction Properties of Saturated Sand[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(2):507-516.
- [6] 杨瑞雪,郝明颖,崔自治,等.黏粒含量对银川细砂强度影响的试验研究[J].科学技术与工程,2018,18(3):105-109.
YANG Ruixue, QIE Yueying, CUI Zizhi, et al. Experimental Study on Influence of Clay Content on Strength of Yinchuan Fine Sand[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(3):105-109.
- [7] 韩华强,陈生水,傅华,等.水泥胶凝砂土动力特性研究[J].岩土工程学报,2016,38(增刊2):54-60.
HAN Huaqiang, CHEN Shengshui, FU Hua, et al. Experimental Study on Dynamic Properties of Cemented Sand[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(Suppl2):54-60.
- [8] 李博,黄茂松.掺有橡胶粉末砂土液化特性的动三轴试验研究[J].岩土力学,2017,38(5):1343-1349.
LI Bo, HUANG Maosong. Dynamic Triaxial Tests on Liquefaction Characteristics of Rubber-sand Mixture[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(5):1343-1349.
- [9] 王忠涛,刘鹏,杨庆.非标准椭圆形应力路径下饱和松砂动强度的试验研究[J].岩土工程学报,2016,38(6):1133-1139.
WANG Zhongtao, LIU Peng, YANG Qing. Dynamic Strength of Saturated Loose Sand under Nonstandard Elliptical Stress Path[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(6):1133-1139.
- [10] MONKUL M M, YAMAMURO J A. Influence of Silt Size and Content on Liquefaction Behavior of Sands[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2011, 48(6):931-942.

[11]

徐奴文.地铁站深基坑开挖与支护有限元数值模拟[D].大连:大连理工大学,2008.
XU Nuwen.Numerical Simulation with FEM on Deep Foundation Excavation and Timbering of Metro Station [D].Dalian:Dalian University of Technology,2008.

[12]

侯文萃,陈能远,高洁.基坑排桩对建筑抗震性的影响分析[J].地震工程学报,2018,40(2):252-257.
HOU Wencui,CHEN Nengyuan,GAO Jie.Analysis of the Influence of Foundation Pit Row Piles on Seismic Resistance of Buildings[J].Journal of Seismological Engineering,2018,40(2):252-257.

[13]

刘超,张建民.应力主轴往返旋转条件下砂土变形规律试验研究[J].地震工程学报,2017,39(1):28-31.
LIU Chao,ZHANGJianmin, Experimental Research on the Deformation of Sand under Principal Stress Back-and-forth Rotation[J].Northwestern Seismological Journal,2017,39(1):28-31.

[15]

徐向辉.明挖地铁站叠合墙与复合墙方案比选[J].铁道标准设计,2005(12):77-80.
Xu Xianghui.Comparison and Selection of Superimposed Wall and Composite Wall Scheme for Open-cut Subway Station[J].Railway Standard Design,2005(12):77-80.

[16]

中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑结构荷载规范:GB50011-2010[S].2010.
Ministry of Housing and Urban—Rural Development of the People’s Republic of China.Code for Load of Building Structures;GB50011-2010[M].2010.

[17]

PITILAKIS K,TSINIDIS G.Performance and Seismic Design of Underground Structures;GB50011-2010[S].2013.

[18]

唐玉元.地连墙式板桩结构地震动力响应规律研究[D].大连:大连理工大学,2016.
TANG Yuyuan, Research on Dynamic Response for Diaphragm Wall Sheet-pile Structures under Earthquake Motion [D].Dalian:Dalian University of Technology,2016.



(上接第 168 页)

[11]

赵丽敏,袁玉卿,李伟,等.黄泛区粉砂土静力特性的试验研究[J].科学技术与工程,2014,14(15):254-258.
ZHAO Limin,YUAN Yuqing,LI Wei, et al. Experimental Study on Static Character of the Silty Soil in the Yellow River Flooded Area[J].Science Technology and Engineering,2014,14(15):254-258.

[12]

来淑娜.地铁荷载下杭州饱和粉砂土动力特性试验研究[D].杭州:浙江工业大学,2013.
LAI Shuna.Research on Dynamic Properties of Hangzhou’s Saturated Silty Sands under Metro Vibration Loading [D].Hangzhou:Zhejiang University of Technology,2013.

[13]

孟凡丽,吕筱,来淑娜.循环荷载下杭州粉砂土动孔压模型研究[J].浙江工业大学学报,2016,44(1):67-71.
MENG Fanli,LÜ Xiao,LAI Shuna.Study on the Model of Dynamic Pore Water Pressure in Silt Soil in Hangzhou under Cyclic Loading[J].Journal of Zhejiang University of Technol-

ogy,2016,44(1):67-71.

[14]

谢定义.土动力学[M].北京:高等教育出版社,2011.
XIE Dingyi. Soil Dynamics [M]. Beijing: Higher Education Press,2011.

[15]

CARMINE P P,JAMES R M.Effects of Nonplastic Fines on the Liquefaction Resistance of Sands[J].Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,2001(9):440-446.

[16]

范基春.粉砂土液化特性试验研究[D].哈尔滨:东北林业大学,2011.
FAN Jichun.The Research on the Liquefaction of Silt [D].Harbin:Northeast Forestry University,2011.

[17]

杨举明.粉细砂液化特性及碎石桩复合地基加固处理研究[D].成都:西南交通大学,2008.
YANG Juming.Study on Liquefaction Characteristics of Silty-Fine Sand and Liquefiable Ground Treated by Gravel Pile Composite Foundation[D].Chengdu:Southwest Jiaotong University,2008.