

宋前进,程磊,贺为民.豫东平原粉质黏土动剪切模量与阻尼比试验研究[J].地震工程学报,2020,42(4):1013-1018.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.04.1013
SONG Qianjin, CHENG Lei, HE Weimin, Experimental Study of the Dynamic Shear Modulus and Damping Ratio of Silty Clay on Eastern Henan Plain[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2020, 42(4): 1013-1018. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2020.04.1013

豫东平原粉质黏土动剪切模量与阻尼比试验研究

宋前进¹, 程磊², 贺为民³

(1. 中国地质大学(北京)工程技术学院, 北京 100083;

2. 河南财经政法大学工程管理与房地产学院, 河南 郑州 450046;

3. 中国地震局地球物理勘探中心, 河南 郑州 450002)

摘要:粉质黏土动剪切模量和阻尼比是建筑场地动力稳定性评价的重要动力参数。为分析豫东平原粉质黏土的动力特性,利用双向振动三轴仪试验系统,对取自豫东平原地区的粉质黏土进行动三轴试验,研究粉质黏土状态及固结压力对动剪切模量和阻尼比的影响。研究发现:可塑粉质黏土(PSC)与软塑粉质黏土(SSC)的动力特性存在相近的变化趋势,动剪切模量比随剪应变的增大而减小,阻尼比随剪应变的增大而增大;在同一应变水平下,SSC的动剪切模量比随固结压力的增大而增大、PSC的阻尼比随固结压力的增大而增大;在相同试验条件下,PSC的最大动剪切模量大于SSC的最大动剪切模量;在剪应变小于0.01%时两者动剪切模量快速衰减,剪应变达到0.03%时两者动剪切模量趋于一致。根据现有的粉质黏土动剪切模量与阻尼比研究成果,结合试验数据,提出粉质黏土动剪切模量比、阻尼比随剪应变变化的数学模型,为豫东平原粉质黏土场地工程建设中的动力稳定性评价提供依据。

关键词:粉质黏土;动三轴试验;动剪切模量;阻尼比

中图分类号: TU411.8

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2020)04-1013-06

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2020.04.1013

Experimental Study of the Dynamic Shear Modulus and Damping Ratio of Silty Clay on Eastern Henan Plain

SONG Qianjin¹, CHENG Lei², HE Weimin³

(1. School of Engineering and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

2. School of Engineering Management and Real Estate, Henan University of Economics and Law, Zhengzhou 450046, Henan, China;

3. Geophysical Exploration Center, China Earthquake Administration, Zhengzhou 450002, Henan, China)

Abstract: The dynamic shear modulus and damping ratio of silty clay are important parameters for evaluating the dynamic stability of building sites on the Eastern Henan Plain. To analyze the dynamic characteristics of silty clay on the Eastern Henan Plain, we conducted a dynamic triaxial test of the silty clay using a bidirectional-vibration triaxial test system. We also studied the influ-

收稿日期: 2019-04-12

基金项目: 中国地震局地震科技星火计划项目(XH15058)

第一作者简介: 宋前进(1975-), 男, 博士研究生。研究方向: 地质灾害防治理论与方法。E-mail: songqj001@163.com。

ence of the state and consolidation pressure of silty clay on its dynamic shear modulus and damping ratio. The results indicate that the changes in the dynamic characteristics of plasticized silty clay (PSC) and soft plastic silty clay (SSC) are similar, with increases in shear strain, their dynamic shear modulus ratios decrease, and the damping ratios increase. Under the same strain, the dynamic shear modulus ratio of SSC and the damping ratio of PSC increase with increases in the consolidation pressure. Under the same test conditions, the maximum dynamic shear modulus of PSC was found to be greater than that of SSC. The dynamic shear moduli of PSC and SSC decrease rapidly when the shear strain is less than 0.01%, and tend to be consistent with each other when the shear strain reaches 0.03%. According to existing research on the dynamic shear modulus and damping ratio of silty clay, combined with experimental data, we propose a mathematical model for the dynamic shear modulus ratio and damping ratio of silty clay with shear strain. The results of this study provide a basis for evaluations of dynamic stability at silty-clay construction sites on the Eastern Henan Plain.

Keywords: silty clay; dynamic triaxial test; dynamic shear modulus; damping ratio

0 引言

动剪切模量与阻尼比是分析建筑物、构筑物场地动力稳定性的重要动力参数^[1-5];动三轴试验、共振柱试验是开展土动剪切模量与阻尼比研究的常用室内试验。王谦等^[6]在室内动三轴试验的基础上,研究黄土高原不同场地饱和黄土动剪切模量比和阻尼比变化特征,分析其区域差异性,采用非线性拟合算法得到顾及物性指标作用的饱和黄土动剪切模量比和阻尼比规律,认为饱和黄土动剪切模量比和阻尼比符合 Hardin-Drnevich 模型。郭婷婷^[7]通过改变围压、轴压,对比均等固结与非均等固结两种情况,做了粉质黏土的动剪切模量与阻尼比试验,结论为均等固结时围压与轴压越大动剪切模量比数值越大、非均等固结时固结比越大动剪切模量比越大。史丙新等^[8]收集了成都平原 107 组粉质黏土与黏土的的动力学参数,给出了它们在不同深度的动剪切模量比和阻尼比的统计值。贺为民等^[9]对比分析了 Hardin-Drnevich 双曲线模型、Davidenkov 模型的优缺点,倾向于通过试验总结阻尼比与动剪切模量之间的规律;刘鑫等^[10]通过共振柱试验分析了南海钙质砂的动剪切模量与阻尼比,建立了钙质砂动剪切模量比、阻尼比的数学模型。张群生^[11]采用动三轴试验研究了围压、含水率等对开封地区粉砂土动剪切模量、阻尼比的影响,基于 Hardin-Drnevich 模型、Davidenkov 模型、Ramberg-Osgood 模型提出了粉砂土动剪切模量比阻尼比规律表达。

目前针对豫东平原粉质黏土动剪切模量与阻尼比的特性研究尚处于积累资料阶段^[12-14]。粉质黏土在豫东平原广泛分布,这种冲洪积成因的粉质

黏土多呈褐黄色、常含蜗牛壳碎片与小颗粒钙质结核、具铁锈斑点等特征,使其物理力学性质异于其他地区的黏性土,而且冲洪积场地的粉质黏土不可避免地受机械、地下水流、地震等周期性荷载作用。因此,针对豫东平原可塑粉质黏土开展动力学参数研究尤为必要。基于此,本位利用 GCTS 双向振动三轴仪试验系统,对取自豫东平原地区的粉质黏土进行动三轴试验,研究粉质黏土的状态、固结压力对动剪切模量和阻尼比的影响,根据试验结果拟合出粉质黏土动剪切模量比衰减曲线和阻尼比增长曲线的数学表达,并给出粉质黏土动力学参数参考值,为豫东平原场地工程建设中的动力稳定性分析提供依据。

1 试样及试验方法

在收集分析豫东平原地震工程地质勘测资料的基础上,通过在典型工程场地布置的 12 个 30 m 深度钻孔进行钻探取样,按现行规范^[15]和试验要求取粉质黏土 I 级原状土样,发现研究区域可塑粉质黏土(PSC)、软塑粉质黏土(SSC)广泛分布;因此,试验土样采用 PSC、SSC。对原状粉质黏土土样进行一系列常规物理性质指标测试试验^[16],获取密度、含水率、比重、液限、塑限等的标准值,其中参与统计分析的 PSC 土样 40 个、SSC 土样 20 个。经统计分析后的试样基本物理性质指标见表 1。

动三轴试验是在给定轴向和侧向压应力固结后施加激振力,使剪应力在土样剪平面上产生周期性交变,有双向激振和单向激振之分;本次室内试验采用美国 GCTS 双向激振动三轴仪进行土体动力学

性质试验^[17]。试样饱和:放进真空饱和装置抽真空,压力稳定在-40 kPa,持续 48 h 后进行反压饱和,直至孔隙压力系数 B 值大于等于 0.93。试验按固结不排水的等压试验进行,试样固结围压按 100 kPa、200 kPa、300 kPa 设定,每个围压下进行 3 次试验,在保持围压固定的条件下对试样轴向和水平

向同时交替施加 180 度相位差循环荷载。动应力幅值逐级增大,动孔压消散再进行下级动应力加载,当动孔压明显增大或应变波形明显不对称时终止试验。整理各级荷载下的动应力应变数据,获取动剪切模量 G 、剪应变 γ 、阻尼比 D 数据,应变范围取 $10^{-6} \sim 10^{-2}$ 。试验方案见表 2 所列。

表 1 土样常规物理力学指标

Table 1 Routine physical and mechanical properties of soil samples								
土样	$\rho / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$\omega / \%$	G_s	$\omega_L / \%$	$\omega_P / \%$	u	e	$n / \text{个}$
PSC	1.764	22.6	2.71	28.3	17.4	0.791	0.882	40
SSC	1.860	28.9	2.72	31.8	19.5	0.909	0.907	20

注: ρ 为试样密度, ω 为试样含水率, G_s 为土粒相对密度, ω_L 为液性界限, ω_P 为塑性界限, u 为含水比, e 为孔隙比, n 为统计分析的土样个数。

表 2 试验方案
Table 2 Experimental scheme

试样	试样编号	I_P	I_L	σ_0 / kPa
可塑粉质黏土	PSC1	10.9	0.48	100
可塑粉质黏土	PSC2	10.9	0.48	200
可塑粉质黏土	PSC3	10.9	0.48	300
软塑粉质黏土	SSC4	12.3	0.76	100
软塑粉质黏土	SSC5	12.3	0.76	200
软塑粉质黏土	SSC6	12.3	0.76	300

注:PSC 为可塑粉质黏土,SSC 为软塑粉质黏土, I_P 为塑性指数, I_L 为液性指数, σ_0 为固结压力。

2 试验数据处理及分析

2.1 粉质黏土状态及固结压力对动剪切模量的影响

根据液性指数划分的粉质黏土不同状态及固结压力下试样的剪应变与动剪切模量关系曲线如图 1 所示,图 1(a)为软塑粉质黏土(SSC)动剪切模量与剪应变关系曲线、图 1(b)为可塑粉质黏土(PSC)动剪切模量与剪应变关系曲线、图 1(c)为将 SSC 与 PSC 放在同一坐标系下的动剪切模量与剪应变关系曲线。在各级固结压力下,可塑粉质黏土、软塑粉质黏土的动剪切模量随剪应变的增大均呈衰减趋势,如图 1(a)、图 1(b)所示;总体而言,在剪应变小于 0.01% 时动剪切模量大幅衰减,随着剪应变的增大动剪切模量缓慢衰减,当剪应变接近 0.03% 时动剪切模量趋于稳定,如图 1(c)所示。固结压力为 100 kPa、200 kPa 时,在同一固结压力、剪应变下,可塑粉质黏土的动剪切模量普遍大于软塑粉质黏土的动剪切模量;而固结压力为 300 kPa 时,在大幅衰减阶段可塑粉质黏土与软塑粉质黏土动剪切模量区别不大,随着剪应变的增大可塑粉质黏土动剪切模量稍大于软塑粉质黏土动剪切模量。对于软塑状粉质黏土,在同一剪应变下,动剪切模量随着固结压力

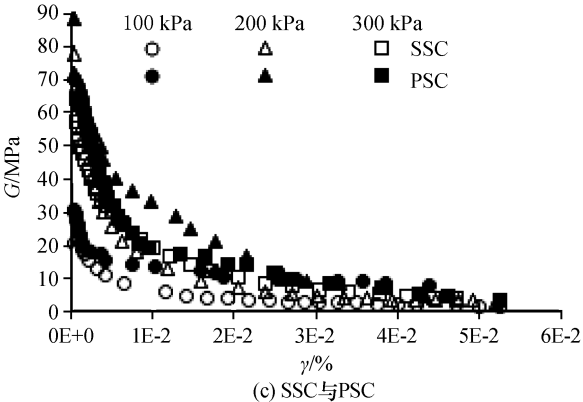
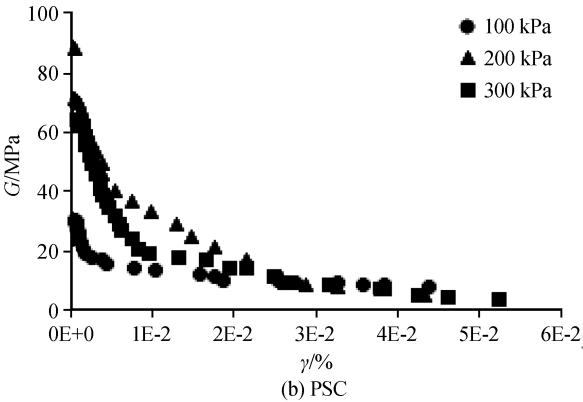
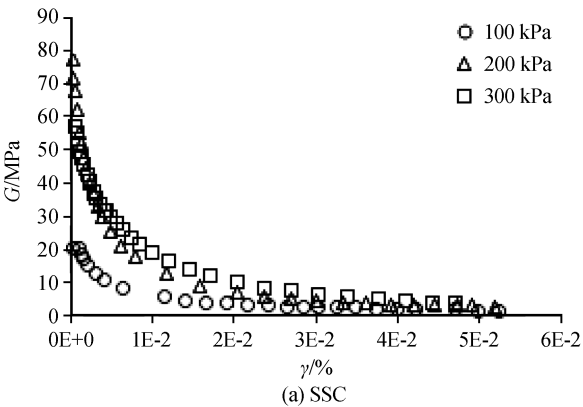


图 1 粉质黏土 $G-\gamma$ 关系曲线
Fig.1 $G-\gamma$ curves of silty clay

的增大而增大;对于可塑状粉质黏土,当剪应变大于 0.03%、在同一剪应变下,固结压力对动剪切模量的影响趋于一致。

2.2 最大动剪切模量 $G_{\max}$

由于最大动剪切模量需要在小动应变条件下测定,动三轴试验精度有限,因此本文采用 Hardin-Ri-chart 及 Hardin-Black 经验公式确定粉质黏土的最大动剪切模量,见式(1)。

$$G_{\max} = 3\,230 \frac{(2.97 - e)^2}{1 + e} OCR^k (\sigma_0)^{0.5} \quad (1)$$

式中: $G_{\max}$ 为最大动剪切模量, σ_0 为固结压力, e 为孔隙比, OCR 为土的超固结比、在此取 1.0, k 为与粉质黏土塑性指数有关的常数,本案例中可塑粉质黏土取 0.10、软塑粉质黏土取 0.11。同时考虑固结压力及土体状态的影响,得到粉质黏土不同状态下 $G_{\max}$ 归一化直线结果如图 2 所示, $G_{\max}$ 随固结压力的增加而增大,可以用线性函数拟合 PSC 与 SSC 的 $G_{\max}$ - σ_0 关系。

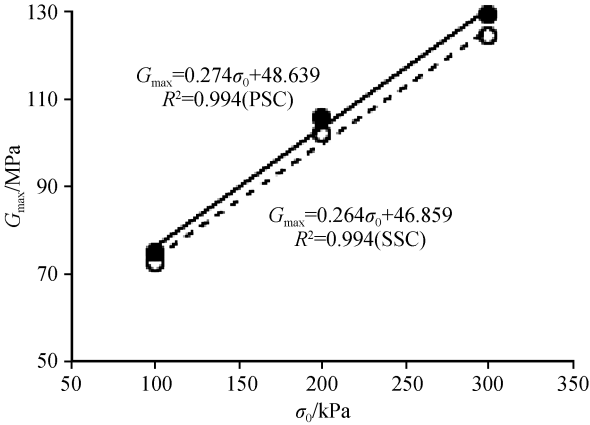


图 2 粉质黏土 $G_{\max}$ 归一化直线

Fig.2 Normalized curves of silty clay $G_{\max}$

3 粉质黏土 $G/G_{\max}$ 与 D 变化规律

3.1 粉质黏土 $G/G_{\max}$ 与 D 随剪应变变化特征

动剪切模量比与阻尼比是分析土体动力特征的关键参数。本次试验粉质黏土动剪切模量比与剪应变关系曲线如图 3 所示,PSC、SSC 的动剪切模量比随动剪应变的增大呈非线性衰减,经历快速衰减并趋于稳定,且 SSC 的 $G/G_{\max}$ 随固结压力的增加而增大; γ 在 0.01%~0.03% 时不同状态粉质黏土的 $G/G_{\max}$ - γ 曲线衰减速率存在差异。

根据液性指数划分的粉质黏土不同状态及固结压力下试样的剪应变与阻尼比关系曲线如图 4 所示。观察图 4:对于可塑及软塑粉质黏土,阻尼比随

剪应变的增大呈非线性增大;剪应变越小对阻尼比的影响越明显,固结压力越大剪应变对阻尼比的影响越明显,相同试验条件下可塑粉质黏土阻尼比大于软塑粉质黏土阻尼比。

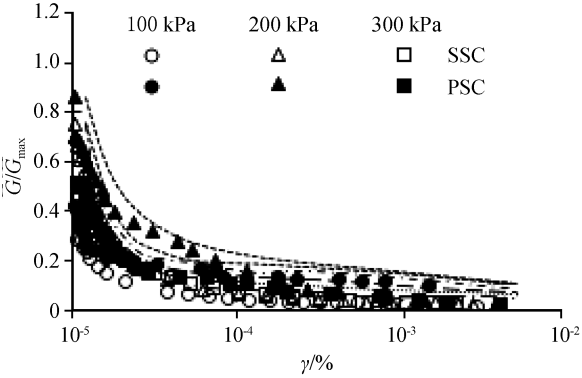


图 3 粉质黏土 $G/G_{\max}$ - γ 关系曲线

Fig.3 $G/G_{\max}$ - γ curves of silty clay

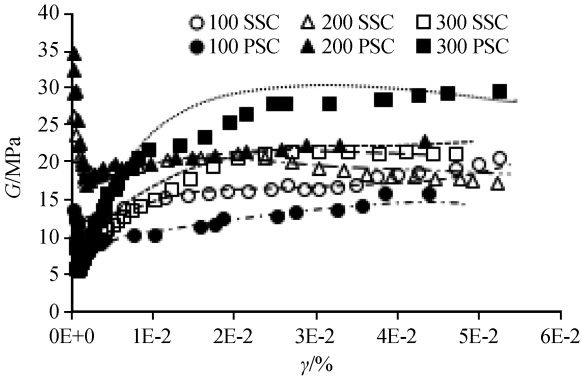


图 4 粉质黏土试验 D - γ 关系曲线

Fig.4 D - γ curves of silty clay

3.2 粉质黏土 $G/G_{\max}$ 与 D 随剪应变变化的数学模型

根据粉质黏土 $G/G_{\max}$ 随剪应变的变化特点,结合 Hardin-Drnevich 双曲线模型,尝试建立 $G/G_{\max}$ - γ 数学模型见式(2)。根据粉质黏土 D 随剪应变的变化特点,结合动应力-动应变滞回曲线法[18],尝试建立 D - γ 数学模型见式(3)。

$$\frac{G}{G_{\max}} = \frac{1}{1 + \gamma/\gamma_0} \quad (2)$$

$$D = \frac{\gamma}{A + B\gamma} \quad (3)$$

式中: γ_0 取 $G/G_{\max}=0.5$ 时的剪应变, A 、 B 为阻尼比拟合参数。PSC 与 SSC 的 $G/G_{\max}$ 、 D 与 γ 拟合曲线如图 5 所示,相关模型参数如表 3 所列。从图 5 及表 3 可以看出,拟合曲线反映的不同状态粉质黏土动力特性与试验值吻合较好,特别是 PSC 的 $G/G_{\max}$ - γ 、 D - γ 数学模型与试验值吻合较好。

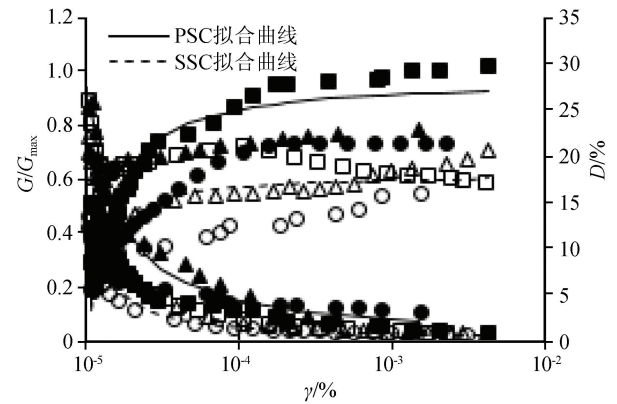


图 5 PSC 与 SSC 的 $G/G_{\max}$ 、 D 与 γ 拟合曲线
Fig.5 $G/G_{\max}$ curves and D - γ curves of PSC and SSC

表 3 模型参数				
Table 3 Model parameters				
土样 类型	D - γ 模型参数		D - γ	$G/G_{\max}$ - γ
	A	B	相关系数 R^2	相关系数 R^2
PSC	0.000 1	0.035	0.884 2	0.938 0
SSC	0.000 1	0.055	0.870 1	0.987 0

4 结论与讨论

(1) 可塑粉质黏土与软塑粉质黏土的动力特性存在相近的变化趋势,动剪切模量比随剪应变的增大而减小,阻尼比随剪应变的增大而增大;在同一应变水平下,软塑粉质黏土的动剪切模量比随固结压力的增大而增大、可塑粉质黏土的阻尼比随固结压力的增大而增大。

(2) 在相同试验条件下,可塑粉质黏土的最大动剪切模量大于软塑粉质黏土的最大动剪切模量;总体而言,在剪应变小于 0.01% 时两者动剪切模量快速衰减,剪应变达到 0.03% 时两者动剪切模量趋于一致、趋于稳定。

(3) 提出了适用于豫东平原可塑及软塑状粉质黏土的动剪切模量比和阻尼比的拟合公式,为粉质黏土地场地动力稳定性分析提供依据。

本文得到的有关粉质黏土的动剪切模量与阻尼比方面的认识基于动三轴试验,受动三轴试验制约,小应变条件下粉质黏土动剪切模量、阻尼比研究仍存在不足。为了保证分析结果的可靠性,研究中通过非线性拟合阻尼比与剪应变关系,但离散性较大,有待通过共振柱试验验证。有关粉质黏土状态及固结条件对动剪切模量阻尼比的影响还不全面,还需进一步分析完善。此外,黏粒含量、塑性指数等物性参数对粉质黏土动剪切模量、阻尼比的影响亦十分显著。因此,开展多种参量耦合条件下的粉质黏土

动力特性研究仍有大量的工作要做。

参考文献(References)

[1] 王猛,杨庆,裴影,等.非饱和黏土动力特性及等价黏弹性模型的试验研究[J].岩土力学,2009,30(4):926-932.
WANG Meng, YANG Qing, NIE Ying, et al. Experimental Study of Dynamic Behavior and Equivalent Viscoplastic Model of Unsaturated Clay[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30 (4):926-932.

[2] 罗飞,何俊霖,朱占元,等.单轴分级循环加载时冻结粉质黏土的动力特性试验研究[J].地震工程学报,2019,41(2):385-391,398.
LUO Fei, HE Junlin, ZHU Zhanyuan, et al. Experimental Study of the Dynamic Characteristics of Frozen Silty Clay under Uniaxial Step Cyclic Loading[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2019, 41(2):385-391,398.

[3] 田兆阳,李平,郑志华,等.软土动力特性动三轴试验研究[J].地震工程学报,2017,39(1):95-99,118.
TIAN Zhaoyang, LI Ping, ZHENG Zhihua, et al. Dynamic Tri-axial Tests on Dynamic Characteristics of Soft Soil[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2017, 39(1):95-99,118.

[4] 周志国,张云雁,符必昌,等.昆明长水国际机场砂页岩残积红土动力特性研究[J].地质力学学报,2018,24(6):795-802.
ZHOU Zhiguo, ZHANG Yunyan, FU Bichang, et al. A Study on Dynamic Characteristics of Sandshale Eluvial Laterite at Kunming Changshui International Airport[J]. Journal of Geomechanics, 2018, 24(6):795-802.

[5] 廖广超,偲钊源,李彰明,等.管桩高应变试验条件下桩周粉质黏土动三轴试验研究[J].广东土木与建筑,2019,26(2):29-32.
LIAO Guangchao, WU Zhaoyuan, LI Zhangming, et al. Dynamic Triaxial Test of Silty Clay around Pipe Pile under the Condition of High Strain Dynamic Test[J]. Guangdong Architecture Civil Engineering, 2019, 26(2):29-32.

[6] 王谦,马金莲,马海萍,等.饱和黄土动剪切模量和阻尼比的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2019,38(9):1919-1927.
WANG Qian, MA Jinlian, MA Haiping, et al. Dynamic Shear Modulus and Damping Ratio of Saturated Loess[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38 (9): 1919-1927.

[7] 郭婷婷.固结比对粉质黏土动力学特性影响的试验研究[J].地球物理学进展,2016,31(6):2729-2734.
GUO Tingting. Testing Study of Effects of Consolidation Ratio of Soils on Dynamic Characteristics[J]. Progress in Geophysics, 2016, 31(6):2729-2734.

[8] 史丙新,周荣军,吕悦军,等.成都平原黏性土动力学参数统计分析[J].震灾防御技术,2015,10(2):305-315.
SHI Bingxin, ZHOU Rongjun, LÜ Yuejun, et al. Research on Dynamic Parameters of Clay Soil in Chengdu Plain[J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2015, 10(2):305-315.

[9] 贺为民,李德庆,杨杰,等.土的动剪切模量、阻尼比和泊松比研究进展[J].地震工程学报,2016,38(2):309-317.

- HE Weimin, LI Deqing, YANG Jie, et al. Recent Progress in Research on Dynamic Shear Modulus, Damping Ratio, and Poisson Ratio of Soils [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2016, 38(2): 309-317.
- [10] 刘鑫, 李飒, 刘小龙, 等. 南海钙质砂的动剪切模量与阻尼比试验研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(9): 1773-1780.
- LIU Xin, LI Sa, LIU Xiaolong, et al. Experimental Study on Dynamic Shear Modulus and Damping Ratio of Calcareous Sands in the South China Sea [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(9): 1773-1780.
- [11] 张群生. 黄泛区粉砂土动力特性动三轴试验研究-以开封地区为例[D]. 开封: 河南大学, 2018.
- ZHANG Qunsheng. Dynamic Triaxial Test Study on Dynamic Characteristics of Silty Sand in the Yellow River Flood Area-Take KaiFeng as Example [D]. KaiFeng: Henan University, 2018.
- [12] 袁玉卿, 李伟, 郭涛, 等. 豫东黄泛区粉砂土的水稳定性研究[J]. 河南大学学报(自然版), 2015, 45(2): 235-238.
- YUAN Yuqing, LI Wei, GUO Tao, et al. Study on Water Stability of Silty Soil in Eastern Henan Section Formerly Flooded by the Yellow River [J]. Journal of Henan University (Natural Science), 2015, 45(2): 235-238.
- [13] 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.
- [14] 黄志全, 郭芳洁, 贾景超, 等. 郑州饱和粉土动剪切模量的试验研究[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2016, 37(1): 64-68.
- HUANG Zhiquan, GUO Fangjie, JIA Jingchao, et al. Experimental Investigation on Dynamic Shear Modulus of Saturated Silt in Zhengzhou [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2016, 37(1): 64-68.
- [15] 中华人民共和国建设部. 岩土工程勘察规范(2009年版): GB500212001[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- Ministry of Construction of the People's Republic of China. Code for Geotechnical Engineering Survey (2009 Edition) GB500212001[S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2009.
- [16] 中华人民共和国水利部. 土工试验方法标准: GB/T 50123-1999[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
- Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Standard for soil test method: GB/T 50123-1999[S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2013.
- [17] 何昌荣. 动模量和阻尼的动三轴试验研究[J]. 岩土工程学报, 1997, 19(2): 39-48.
- HE Changrong. Dynamic Triaxial Test on Modulus and Damping [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1997, 19(2): 39-48.
- [18] 赵强, 陈勇. 长期循环荷载作用下粉质黏土动力特性及相关模型修正[J]. 长江科学院院报, 2018, 35(12): 123-128.
- ZHAO Qiang, CHEN Yong. Dynamic Characteristics and Modification of Relevant Models of Silty Clay Under long-term Cyclic Loading [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2018, 35(12): 123-128.