

谭彩,万里,袁明道,等.压实度对脱硫石膏动强度和动孔压影响试验[J].地震工程学报,2021,43(5):1238-1243.DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2021.05.1238

TAN Cai,WAN Li,YUAN Mingdao,et al.Experimental study of the influence of compaction degree on dynamic strength and dynamic pore pressure of desulfurization gypsum[J].China Earthquake Engineering Journal,2021,43(5):1238-1243.DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2021.05.1238

压实度对脱硫石膏动强度和动孔压影响试验

谭 彩¹, 万 里², 袁明道¹, 卢 博³, 杨文滨¹

(1. 广东省水利水电科学研究院, 广东 广州 510610;

2. 四川大学 水力学与山区河流开发保护国家重点实验室 水利水电学院, 四川 成都 610065;

3. 中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司, 湖南 长沙 410014)

摘要: 为研究压实度对脱硫石膏动强度与动孔压特性影响, 对压实度为 0.85、0.90 和 0.95 三组脱硫石膏进行等压固结不排水振动三轴试验, 试验围压为 100 kPa、200 kPa 和 400 kPa。结果表明: 随压实度增大, 脱硫石膏颗粒间作用力愈强, 颗粒联结骨架越不容易破坏, 脱硫石膏动强度越大, 动孔压增长越慢; 试验压实度范围内, 脱硫石膏动剪应力比和动内摩擦角均与压实度呈线性相关; 试验用脱硫石膏可分类定名为低液限粉土, 其动强度曲线和动孔压发展模式均与常规粉土类似, 分别可通过幂函数和对数函数表征, 经 F 值试验法检验, 其统计回归显著性水平均为“高度显著”。

关键词: 脱硫石膏; 压实度; 动强度; 动孔压

中图分类号: TU 411

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2021)05—1238—06

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2021.05.1238

Experimental study of the influence of compaction degree on dynamic strength and dynamic pore pressure of desulfurization gypsum

TAN Cai¹, WAN Li², YUAN Mingdao¹, LU Bo³, YANG Wenbin¹

(1. Guangdong Research Institute of Water Resources and Hydropower, Guangzhou 510610, Guangdong China;

2. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, College of Water Resource & Hydropower Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan, China;

3. Power China Zhongnan Engineering Corporation Limited, Changsha 410014, Hunan, China)

Abstract: To study the effect of degree of compaction on the dynamic strength and dynamic pore pressure of desulfurization gypsum, a series of undrained dynamic triaxial tests were carried out on three groups of desulfurization gypsum, with compaction degrees of 0.85, 0.90, and 0.95. The confining pressures were 100, 200, and 400 kPa, respectively. Test results showed that, with increasing compaction degree, the connected skeleton of particles of desulfurization gypsum is more difficult to destroy, and the dynamic strength and dynamic pore pressure of desulfurization gypsum increase, though the latter increases slowly. The dynamic shear stress ratio and dynamic inner friction angle of desulfurization gypsum show a linear relationship with the compaction de-

收稿日期:2020-01-12

基金项目:深圳市水务发展专项资金科技创新项目(20170103);广东省水利科技创新项目(2014-09)

第一作者简介:谭 彩(1992—),男,湖南衡阳人,工程师,硕士,研究方向为土的本构模型与数值模拟。E-mail:sancytan@163.com。

gree. The tested desulfurization gypsum can be classified as a low-liquid-limit silt. Curves of dynamic strength and dynamic pore pressure were similar to those of conventional silt, which can be regressed by power function and logarithmic function, respectively. Through verification with the F test method, the significance level of the statistical regression was "highly significant."

Keywords: desulfurization gypsum; compaction degree; dynamic strength; dynamic pore pressure

0 引言

脱硫石膏是燃煤电厂湿法脱硫产生的废弃物,由于其产量大、利用率低,目前仍以筑坝堆放处理为主^[1]。受沉积条件和碾压程度等因素影响,其压实度存在明显差异。近年来,地震灾害频发,脱硫石膏作为一种动力敏感材料^[2],有必要对不同压实度下脱硫石膏动力特性进行研究。

目前,动荷载作用下不同压实度土体的动强度特性研究较为成熟^[3-5]。谷天峰等^[6]对不同压实度下黄土动强度特性进行动三轴试验研究,指出压实度较小时,土体孔隙较大,结构较松散,颗粒间联结力较小,动强度小;随压实度增大,土体逐渐趋于密实,颗粒间联结力逐渐增大,动强度逐渐增大。陈国兴等^[7]研究了不同相对密实度砂砾土动强度特性,指出随相对密实度增大,砂砾土动强度逐渐增大,且随循环增次增大,不同相对密实度下砂砾土动强度关系曲线逐渐趋于相近。

动荷载作用下土体孔压发展模式与土体变形强度变化密切相连,是采用有效应力法分析饱和土体动力稳定的基础。目前,动荷载作用下饱和砂土和粉土孔压发展模式研究较为成熟^[8-10]。Seed 等^[11]通过对砂土进行振动三轴试验,建立了砂土动孔压模型,即 Seed 动孔压模型,该模型发展模式表现为由微凸向微凹变化,即前期孔压发展较快,而后稳定增长,临近破坏时又迅速增大。于濂洪等^[12]研究了饱和粉土动孔压发展规律,提出了适用于粉土的幂函数孔压模型。

脱硫石膏作为一种颗粒材料,其动强度和动孔压特性与常规粉土可能存在差异,压实度对脱硫石膏动强度和孔压特性影响研究有待进一步加强。本文对不同压实度脱硫石膏进行振动三轴试验,研究了压实度对脱硫石膏动强度和动孔压特性的影响,建立了脱硫石膏动强度和动孔压经验表达式,并采用 F 检验法对其统计回归效果进行显著性检验。

1 试验

1.1 试验仪器

试验仪器为单向振动三轴仪,仪器主要由主机、

测控系统和传感器等构成,如图 1 所示。其中,主机为 DZ78-1 型电磁式动三轴仪;测控系统为 DDS-70 动三轴测试系统;力传感器型号为 BLR-1,孔压传感器型号为 AK-1(量程 0~1 MPa),位移传感器为 DA-12.5(量程±12.5 mm)。



图 1 试验仪器

Fig.1 Test instrument

1.2 试验土料

试验土料取自云南某电厂脱硫石膏,颜色为灰白色,比重 $G_s=2.53$ 。采用粒度分析仪对其粒度分布进行测定,试验平行两次进行,测定土样分别编号为 G_1 和 G_2 ,取两次测定结果平均值为试验结果,脱硫石膏级配如图 2 所示。砂粒($1\sim0.075$ mm)占 6.92%,粉粒($0.075\sim0.005$ mm)占 82.84%,黏粒($\leqslant0.005$ mm)占 10.24%,液限 $M_L=29.6\%$,塑性指数 $I_P=7.5$,可分类定名为低液限粉土 $M_L^{[13]}$ 。通过轻型击实试验确定最大干密度 $\rho_{dmax}=1.56 \text{ g/cm}^3$,最优含水率 $w_{op}=19.4\%$ 。

1.3 试验程序

根据云南某电厂脱硫石膏坝勘探成果,结合收集到的其他相关脱硫石膏坝资料,脱硫石膏坝筑坝堆放压实度 R 基本在 0.85~0.95 区间内,故拟定 3 个压实度($R=0.85, 0.90, 0.95$),确定制样干密度和

含水率。试样直径 $\Phi = 50.0 \text{ mm}$, 高 $H = 115.0 \text{ mm}$, 采用湿捣法分五层制备, 精确称取每层土样重量, 并用钢尺测量每层高度, 确保每层击实高度一致, 为保证上下土层接触良好对每层脱硫石膏接触面进行刮毛处理。试样饱和方法为真空抽气饱和法, 饱和及试样用水均为蒸馏水。

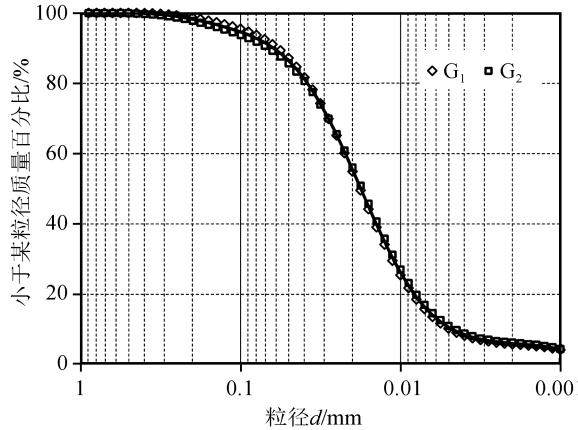


图 2 土料级配

Fig.2 Gradation of soil

试样饱和后, 缓慢打开排水阀, 对试样进行双面排水固结, 固结方式为等压固结, 围压 $\sigma_3 = 100 \text{ kPa}$ 、 200 kPa 和 400 kPa 。固结稳定后测记排水量, 以关闭排水阀五分钟后孔隙水压力不再上升作为固结稳定标准。固结完成后施加循环动荷载, 荷载波形为正弦波, 振动频率 1 Hz 。每一围压试验土样为 $5 \sim 7$ 个, 施加不同振动荷载, 当孔压等于围压或轴向应变为 10% 时停止试验。

目前土体动力破坏标准主要有两种: 一是孔压破坏标准, 认为动孔压 u_d 等于围压 σ_3 时试样破坏; 一是变形破坏标准, 根据工程重要性及经验一般取应变值 $\epsilon_d = 5\%$ 。本次试验采用孔压标准 ($u_d = \sigma_3$) 和变形标准 ($\epsilon_d = 5\%$) 双重破坏标准^[14]。

2 试验结果与分析

2.1 动强度

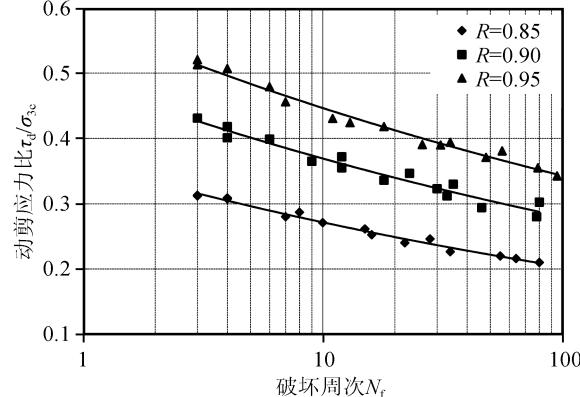
不同压实度下脱硫石膏动剪应力比 τ_d/σ_{3c} 与破坏振次 N_f 关系曲线如图 3 所示。可知:(1) 随压实度 R 增大, 土体愈紧密, 土颗粒间作用力愈强, 颗粒原有联结骨架越不容易破坏, 同一 N_f 下 τ_d/σ_{3c} 逐渐增大, 脱硫石膏动强度越大;(2) 不同 σ_{3c} 下, 同一压实度脱硫石膏试验点基本落在同一条曲线上, 随 N_f 增大, τ_d/σ_{3c} 逐渐减小, 与粉土类似, 归一化动强度曲线可采用幂函数进行描述:

$$\frac{\tau_d}{\sigma_{3c}} = \left(\frac{a}{N_f^b} \right) \quad (1)$$

式中: τ_d 为循环动剪应力 (kPa); σ_{3c} 为有效固结压力 (kPa); N_f 为破坏振次; a, b 试验系数, 可通过数理统计回归获得。采用 F 值检验法对其统计回归效果进行显著性检验, F 值为:

$$F = (n - 2) \frac{\gamma^2}{1 - \gamma^2} \quad (2)$$

式中: n 为回归统计试验样本数; γ 为相关系数。取显著性水平 α 为 0.05 和 0.005 , 当 $F > F_{0.95}(1, n-2)$ 时, 回归效果“显著”。当 $F > F_{0.995}(1, n-2)$ 时, 回归效果“高度显著”。

图 3 不同压实度下脱硫石膏 τ_d/σ_{3c} - N_f 关系曲线Fig.3 Relationship curve of τ_d/σ_{3c} - N_f for desulfurization gypsum under different compactness

试验系数 a, b 及回归效果显著性检验成果汇总见表 1。可知:(1) 不同 R 下脱硫石膏动强度曲线采用幂函数拟合效果良好, 试验统计回归显著性水平均为高度显著, 土体动强度曲线可由系数 a, b 表征; (2) 随 R 增大, 系数 a 逐渐增大, 系数 b 基本保持不变, 约为 0.12 , 故试验用脱硫石膏动强度曲线可改写为:

$$\frac{\tau_d}{\sigma_{3c}} = \left(\frac{a}{N_f^{0.12}} \right) \quad (3)$$

值得指出的是, 式(3)通过本文试验用脱硫石膏得出, 是否适用于其他脱硫石膏尚有待进一步验证。

表 1 动强度曲线统计回归及误差计算成果表

Table 1 Result table of statistical regression of dynamic strength curve and error calculation

压实度 R	样本数 n	a	b	相关系数 γ	F	显著性水平
0.85	21	0.36	0.12	0.98	461	高度显著
0.90	21	0.49	0.12	0.96	223	高度显著
0.95	21	0.58	0.12	0.99	936	高度显著

根据 Seed 等^[15]提出的等效循环理论, 地震震

级不同时,作用于脱硫石膏的剪应力形式与作用次数不同,但其达到的液化效果相同。地震震级为 6 级、6.5 级、7 级、7.5 级和 8 级对应等效循环次数 N_e 分别为 5 次、8 次、12 次、20 次和 30 次。不同 N_e 下动剪应力比 τ_d/σ_{3c} 与压实度关系曲线如图 4 所示。可知,随 R 增大,脱硫石膏 τ_d/σ_{3c} 逐渐增大,试验压实度范围内 τ_d/σ_{3c} 与 R 呈明显线性关系。

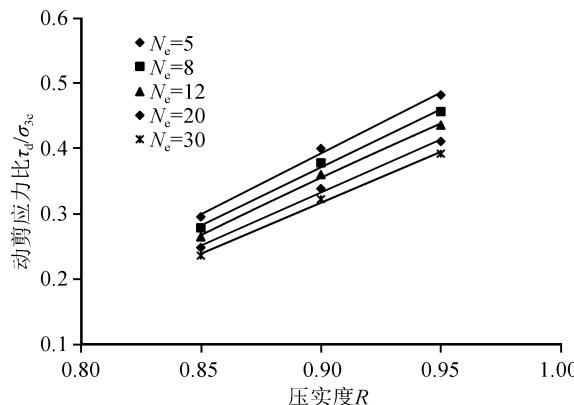


图 4 不同等效振次下脱硫石膏 τ_d/σ_{3c} -R 关系曲线

Fig.4 Relationship curve of τ_d/σ_{3c} -R for desulfurization gypsum under different equivalent cyclic number

绘制摩尔-库伦曲线,确定不同 N_e 下脱硫石膏动内摩擦角 φ_d 与压实度 R 关系曲线如图 5 所示。可知:(1)试验压实度范围内,随 R 增大,颗粒咬合越紧密,脱硫石膏 φ_d 逐渐增大, φ_d 与 R 呈良好线性关系;(2)随 N_e 增大,脱硫石膏 φ_d 减小,说明地震震级越高,土体越容易破坏。

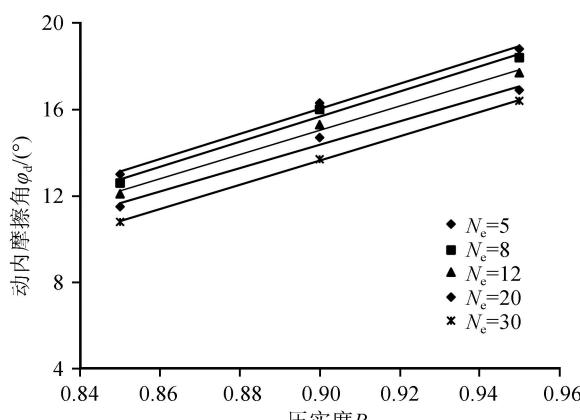


图 5 不同等效振次下脱硫石膏 φ_d -R 关系曲线

Fig.5 Relationship curve of φ_d -R for desulfurization gypsum under different equivalent cyclic number

2.2 动孔压

图 6 为不同压实度 R 下脱硫石膏动孔压比 u_d/σ_{3c} 与破坏振次比 N/N_f 关系曲线。可知:(1)同一

N/N_f 下,随 R 增大,动孔压比 u_d/σ_{3c} 逐渐增大,动孔压增长越快;这主要是由于动荷载作用下,土颗粒会出现彼此脱离,原本由土颗粒接触点传递的压力转为孔隙水承担,使得孔隙水压力上升^[16],随 R 增大,土体愈紧密,土颗粒彼此脱离愈困难;(2)脱硫石膏动孔压发展与常规粉土类似^[17-19],随 N/N_f 增大,脱硫石膏孔压发展表现为先迅速增长而后趋于平稳。

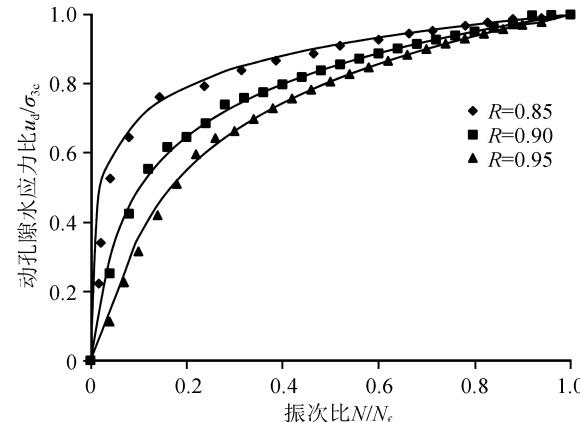


图 6 不同压实度下脱硫石膏 u_d/σ_{3c} -N/N_f 关系曲线

Fig.6 Relationship curve of u_d/σ_{3c} -N/N_f for desulfurization gypsum under different compactness

目前一般认为^[17-19]粉土孔压发展曲线符合张建民等建立的 A 型曲线,粉土孔压发展表达式为:

$$\frac{u_d}{\sigma_{3c}} = c(1 - e^{-d \frac{N}{N_f}}) \quad (4)$$

式中: c 、 d 为拟合参数; c 表示 $N \rightarrow N_f$ 的值。

然而式(4)仅对粉土孔压发展曲线前半段拟合效果好,且 N/N_f 趋近于 1 时, u_d/σ_{3c} 不一定趋近于 1,与等压固结粉土液化机理不符。为合理描述脱硫石膏孔压发展规律,进而为粉土孔压发展关系式确立提供参考依据。根据脱硫石膏孔压发展模式,采用数理统计回归确定脱硫石膏孔压发展表达式为:

$$\frac{u_d}{\sigma_{3c}} = m \ln\left(\frac{N}{N_f}\right) + k \quad (5)$$

式中: m 、 k 为拟合参数,当 $N/N_f \rightarrow 1$, $u_d/\sigma_{3c} \rightarrow k$;脱硫石膏液化时($N/N_f = 1$), $u_d/\sigma_{3c} = 1$ 。式(5)可改写为:

$$\frac{u_d}{\sigma_{3c}} = m \ln\left(\frac{N}{N_f}\right) + 1 \quad (6)$$

试验系数 m 及回归效果显著性检验成果汇总见表 2。可知,不同 R 下脱硫石膏动孔压曲线采用式(6)拟合效果良好,试验统计回归显著性水平均为高度显著,土体动孔压曲线可通过系数 m 表征,随

R 增大,系数 m 逐渐增大。

表 2 动孔压曲线统计回归及误差计算成果表

Table 2 Result table of statistical regression of dynamic pore water pressure curve and error calculation

压实度 R	样本数 n	相关系数 γ	F	显著性 水平
0.85	21	0.55	0.99	936
0.90	21	0.73	0.99	936
0.95	21	0.92	0.99	936

3 结语

对压实度为 0.85、0.90 和 0.95 三组脱硫石膏进行了振动三轴试验,分析了压实度对脱硫石膏动强度和动孔压的影响,主要结论如下:

(1) 随压实度增大,脱硫石膏颗粒间作用力愈强,颗粒联结骨架越不容易破坏,动强度越大;试验压实度范围内,脱硫石膏动剪应力比和动内摩擦角均与压实度呈线性相关;

(2) 动荷载作用下,土颗粒会出现彼此脱离,原本由土颗粒接触点传递的压力转为孔隙水承担,随压实度增大,脱硫石膏颗粒彼此脱离愈困难,动孔压增长越慢;

(3) 试验用脱硫石膏可分类定名为低液限粉土,其强度曲线和动孔压发展模式均与常规粉土类似,分别可通过幂函数和对数函数表征。

参考文献(References)

- [1] 彭君,罗启迅,陈群.掺石膏灰渣混合料的力学性质试验分析[J].水电能源科学,2014,32(11):121-123,88.
PENG Jun, LUO Qixun, CHEN Qun. Experimental analysis of mechanical properties of mixture of fly ash, cinder and gypsum [J]. Water Resources and Power, 2014, 32(11): 121-123, 88.
- [2] 张超,杨春和,余克井,等.磷石膏物理力学特性初探[J].岩土力学,2007,28(3):461-466.
ZHANG Chao, YANG Chunhe, YU Kejing, et al. Study on physico-mechanical characteristics of phosphogypsum[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(3): 461-466.
- [3] 许书雅,王平,王峻,等.强震作用下不同处理方式黄土地基抗震性能评价[J].地震工程学报,2018,40(6):1198-1205..
XU Shuya, WANG Ping, WANG Jun, et al. Evaluation of seismic subsidence of loess foundation with different ground treatments under strong earthquake[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2018, 40(6): 1198-1205.
- [4] 余芳涛,王松鹤,李军琪,等.贮灰场子坝粉煤灰动力特性试验研究[J].地震工程学报,2018,40(5):1018-1025.
SHE Fangtao, WANG Songhe, LI Junqi, et al. Experimental study of dynamic characteristics of fly ash in ash storage dams [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2018, 40(5): 1018-1025.
- [5] 赖夏蕾,简文彬,许旭堂,等.福州淤泥质土动力特性室内试验研究[J].工程地质学报,2016,24(6):1302-1308.
LAI Xiaolei, JIAN Wenbin, XU Xutang, et al. Experimental study on dynamic characteristics of muddy soil in Fuzhou[J]. Journal of Engineering Geology, 2016, 24(6): 1302-1308.
- [6] 谷天峰,王家鼎,刘亚明.循环荷载下压实黄土动强度特性研究[J].工程地质学报,2015,23(4):604-608.
GU Tianfeng, WANG Jiading, LIU Yaming. Dynamic strength characteristics of compacted loess under cyclic loads[J]. Journal of Engineering Geology, 2015, 23(4): 604-608.
- [7] 陈国兴,孙田,王炳辉,等.循环荷载作用下饱和砂砾土的破坏机理与动强度[J].岩土工程学报,2015,37(12):2140-2148.
CHEN Guoxing, SUN Tian, WANG Binghui, et al. Undrained cyclic failure mechanisms and resistance of saturated sand-gravel mixtures[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(12): 2140-2148.
- [8] 王艳丽,王勇.饱和砂的动孔压演化特性试验研究[J].同济大学学报(自然科学版),2009,37(12):1603-1607.
WANG Yanli, WANG Yong. Experimental study on evolutionary characteristics of dynamic pore water pressure of saturated sands[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2009, 37(12): 1603-1607.
- [9] 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.
- [10] 谭凡,饶锡保,黄斌,等.饱和尾矿粉土动力特性试验研究[J].地震工程学报,2015,37(3):772-777.
TAN Fan, RAO Xibao, HUANG Bin, et al. Experimental study of the dynamic characteristics of tailings silts[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2015, 37(3): 772-777.
- [11] SEED H B, LEE K L. Liquefaction of saturated sands during cyclic loading[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1966, 92(6): 105-134.
- [12] 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(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(4): 59-62.
- [13] 土工试验规程:SL 237—1999[S].北京:中国水利水电出版社,1999.
Specification of soil test: SL 237—1999[S]. Beijing: China Water Power Press, 1999.
- [14] 谭彩.含细粒砂动力特性试验及数值模拟[D].成都:四川大学,2017.
TAN Cai. Test and numerical simulation of dynamic properties of sand with fines[D]. Chengdu: Sichuan University, 2017.
- [15] SEED H B. Soil liquefaction and cyclic mobility evaluation for level ground during earthquakes[J]. Journal of the Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1990, 116(10): 1022-1032.

- cal Engineering Division, 1979, 105(2): 201-255.
- [16] 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.
- [17] 曾长女,刘汉龙,陈育民.细粒含量对粉土动孔压发展模式影响的试验研究[J].岩土力学,2008,29(8):2193-2198.
ZENG Changnv, LIU Hanlong, CHEN Yuming. Test study on influence of fine particle content on dynamic pore water pressure development mode of silt[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(8): 2193-2198.
- [18] 褚卫瑞.细粒含量对尾矿砂动力特性影响研究[J].矿业研究与开发,2017,37(2):70-73.
- CHU Weirui. Influence of fine content on dynamic characteristics of tailings sand[J]. Mining Research and Development, 2017, 37(2): 70-73.
- [19] 马一霁,冯艳辉,王武刚.淮南地区饱和粉土动孔压模型试验与有限元对比分析[J].建筑结构,2017,47(增刊1):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 (Suppl01): 1166-1169.

(上接第 1213 页)

- [12] 黄博,胡俊清,施明雄,等.单、双向动三轴试验条件下饱和砂动力特性对比[J].西北地震学报,2011,33(增刊1):137-142.
HUANG Bo, HU Junqing, SHI Mingxiong, et al. Comparison of dinamic properties of saturated sand under unidirectional and two-directional cyclic triaxial tests conditons[J]. North-western Seismological Journal, 2011, 33(Suppl01): 137-142.
- [13] 刘潇,张学,赵俭斌,等.单、双向振动条件下饱和粉砂变形特性对比试验研究[J].地震工程学报,2015,37(3):748-753.
LIU Xiao, ZHANG Xue, ZHAO Jianbin, et al. Study on deformation characteristics of saturated silty sand in uni-and bi-directional cyclic triaxial tests[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2015, 37(3): 748-753.
- [14] 周小生.双向循环荷载作用下膨胀土的动力特性与路基响应特征研究[D].武汉:中国科学院武汉岩土力学研究所,2010.
ZHOU Xiaosheng. The dynamic characteristics of expansive soil and dynamic behaviors of subgrade under the bidirectional cyclic loading[D]. Wuhan: Institute of Rock & Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, P.R.China, 2010.
- [15] 马宇涛.南阳膨胀土的双向动力特性试验研究[D].郑州:华北水利水电大学,2017.
MA Yutao. Nanyang expansive soil test study on the dynamic characteristics of bidirectional [D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2017.
- [16] 王枚鹏,骆亚生,刘建龙,等.双向动荷载下重塑红黏土动变形特性研究[J].地震工程学报,2017,39(6):1046-1053.
WANG Mipeng, LUO Yasheng, LIU Jianlong, et al. Dynamic deformation characteristics of remolded red clay under bidirectional dynamic load[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2017, 39(6): 1046-1053.
- [17] 张希栋,骆亚生.双向动荷载下黄土的动剪切模量特性研究[J].岩土力学,2015,36(9):2591-2598.
ZHANG Xidong, LUO Yasheng. Study of dynamic shear modulus of loess under bidirectional dynamic loads[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(9): 2591-2598.
- [18] IDRISI I M, DOBRY R, SINGH R D. Nonlinear behavior of soft clays during cyclic loading[J]. Journal of Soil Mechanics and Foundation, 1978, 104(12): 1427-1447.