

DOI: 10.11779/CJGE2024S10027

波浪荷载作用下防波堤地基土动强度试验研究

李治朋^{1,2}, 李一良^{*3}, 张宇亭²

(1. 天津水运工程勘察设计院有限公司天津市水运工程测绘技术重点实验室, 天津 300456; 2. 交通运输部天津水运工程科学研究所港口水工建筑技术国家工程研究中心, 天津 300456; 3. 河南省地质研究院, 河南 郑州 450001)

摘要: 通过模拟波浪荷载, 对防波堤地基土做了等压固结不排水动三轴剪切试验, 分析得出, 循环剪应力比与破坏振次可用幂函数拟合, 但拟合参数不是常数, 与土类和围压有关; 土体在剪切过程中孔隙水压力会不断增加, 但始终没有达到初始的围压数值, 达到破坏标准时, 约为初始围压的 60%~80%; 动孔压比与振次比关系可用幂函数很好地拟合, 拟合参数不是常数, 与土性有关; 3 种土的动应变发展模式不同, 粉质黏土的压应变一直大于拉应变, 粉土是压应变与拉应变基本同时发展, 砂土则在开始一段时间, 轴向应变很小, 压应变小于拉应变, 中后期, 轴向应变迅速增长, 压应变逐渐超过了拉应变。

关键词: 波浪荷载; 动三轴试验; 动强度; 振次; 孔隙水压力; 应变

中图分类号: TU411 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2024)S1-0186-05

作者简介: 李治朋(1984—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事岩土工程方面的测试与研究。E-mail: 275923996@qq.com。

Experimental study on dynamic strength of breakwater foundation under wave loads

LI Zhipeng^{1,2}, LI Yiliang³, ZHANG Yuting²

(1. Tianjin Survey and Design Institute for Water Transport Engineering Co., Ltd., Tianjin Key Laboratory of Surveying and Mapping for Waterway Transport Engineering, Tianjin 300456, China; 2. Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, M.O.T., National Engineering Laboratory for Port Hydraulic Construction Technology, Tianjin 300456, China; 3. Henan Academy of Geology, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: By simulating wave loads, the dynamic triaxial shear tests foundation soils of on breakwaters under isobaric consolidation and undrained flow are carried out. The analysis shows that the cyclic shear stress ratio can be fitted by the power function with failure frequency, but the fitting parameters are not constant. The pore water pressure of soils will increase continuously in the course of shear, but it does not reach the initial value of confining pressure. When it reaches the failure standard, it is about 60%~80% of the initial confining pressure. The relationship between the dynamic pore pressure ratio and the vibration frequency ratio can be well fitted by the power function, and the fitting parameters are not constant, which are related to soil properties. At the beginning, the axial strain is very small, and the compressive strain is less than the tensile strain. At the middle and later stages, the axial strain increases rapidly, and the compressive strain gradually exceeds the tensile strain.

Key words: wave load; dynamic triaxial test; dynamic strength; vibration; pore water pressure; strain

0 引言

多年来, 世界吞吐量最大的十大港口中国占了七个, 码头、防波堤等水运工程基础设施提供了根本保证, 这些水运工程设施地基长期受波浪荷载的作用, 还有海上石油平台、海上风电等水工建筑物以及岸线岸坡地基等也都受到波浪荷载的作用。因此, 研究波浪荷载作用下地基土体应力应变性状具有重要意义。

波浪在各种外力作用下, 水质点离开其平衡位置做周期性或准周期性的运动, 从而导致波形传播, 波

浪作用于土体或结构, 即形成波浪荷载, 波浪荷载作为一种循环荷载, 具有自身的一些特点, 波高、波速及周期是描述波浪运动特征的要素, 这种波浪荷载的周期一般为 1~20 s。波浪荷载作用在海底土体上, 将会引起土体中动应力、动应变以及孔隙水压力的增大。

基金项目: 天津市科技计划项目 (23YDPYCG00010); 国家自然科学基金面上项目 (41572297)

收稿日期: 2024-04-28

***通信作者** (E-mail: 18695821097@qq.com)

孔隙水压力的增大将导致土体有效应力的下降, 从而降低了土的强度, 甚至引起海床土体的液化和滑动, 导致地基失稳^[1]。已有不少学者先后研究了土体在动荷载作用下的应力应变发展模式, 如, 张晨明等^[2]模拟波浪荷载作用下福建标准砂的应力应变关系; 孟凡丽等^[3]通过模拟波浪荷载作用下海底粉土动三轴试验, 得出粉土的动应变和动强度的发展与土样所受的固结应力、围压、循环应力比和振动频率有关; 闫澍旺等^[4]模拟防波堤地基土在波浪循环荷载作用下的实际应力路径, 由试验数据确定了不同荷载组合下软黏土抗剪强度折减率的规律性曲线, 进而确定了波浪循环荷载作用下软黏土的强度弱化程度; 张建民等^[5]对频率范围为 1~20 Hz 的均等和非均等固结条件下的砂土进行的动三轴试验表明: 振动频率越高, 砂土达到液化所需要的振动时间急剧减少, 而砂土的动孔压则基本不受振动频率影响; 陈国兴等^[6]发现粉质黏土与粉砂互层土的振动孔压发展模式与粉细砂的不同, 可以用双曲线进行拟合, 而粉细砂的振动孔压发展模式与 Seed 等^[7]提出的砂土的振动孔压发展模式相同, 可以用反正弦三角函数拟合, 对于粉质黏土与粉砂互层土, 当以轴向双幅应变 5% 作为液化标准时, 其发生液化的振动孔压均达不到围压值; 曾长女等^[8]研究发现粉质土孔压可以用一个改进的指数形式来描述; 郭莹等^[9]进行的动三轴试验表明, 饱和密砂和松砂在各种固结条件下, 液化强度随着振动频率的增大而增大, 相同破坏振次时, 各种试验条件下的液化强度与振动频率的关系在双对数坐标上均符合线性关系; 张健等^[10]认为归一化后的振动孔隙水压力比与振次比之间的关系可以用反正弦三角函数来拟合。学者们为探索土体的动力学特性, 做了大量研究, 得出了许多成果。

土是一种非均质弹塑性材料, 各地土体的成因、物质组成、受力历史等都不一样, 土的性质极有可能不一样, 比一般的建筑材料复杂的多, 动荷载又比静力作用复杂, 土体受动荷载作用时, 其强度、孔压以及变形等发展模式极有可能因地而异, 甚至因荷载作用方式而不同, 有些已有结论很可能不适用。本文模拟波浪荷载特点, 初步研究了防波堤地基土体的动强度、动孔压及变形的发展规律。

1 试验条件

试验土样取自天津某防波堤地基土, 基底以下土层分布为 6 m 深度范围多为粉土、粉质黏土, 中间夹有粉土、粉砂以及淤泥质黏土层。粉质黏土和粉土试样为原状土, 粉砂试样采用分 3 层击实成型, 密度接近原状土密度, 试样直径 39.1 mm, 高 80 mm。试验

土样为饱和状态。试验土样的物理性质指标见表 1。

试验仪器为河海大学岩土工程研究所的 DDS-70 型动三轴仪, 仪器的主要技术参数见表 2, 采用固结不排水动三轴剪切试验, 各向等压固结, 即试样的固结应力比 $K_c = \sigma_1 / \sigma_3 = 1.0$, 围压 $\sigma_3 = 50, 100, 200$ kPa。固结完成后在不排水条件下施加轴向激振力, 试验波形选为正弦波。波浪荷载一般为低频, 其周期一般为 1~20 s, 试验动荷载频率为 1.0 Hz。试验土样的土性不同, 因此, 含水率、密度等物理指标差异略大, 对试验结果的判定基本没有影响。

土体动强度是指在某种静应力条件下, 循环周期荷载使土样在一定加载周期内达到某种破坏标准所需要的剪应力。试验中以试样在周期剪切时轴向周期应变达到 5% 作为破坏标准。

表 1 土样的物理性质

Table 1 Physical property indexes of soil samples

土类	含水率 /%	密度/ (g·cm ⁻³)	液限/ %	塑限/ %	塑性 指数	液性 指数
粉质黏土	29.6	1.86	30.8	17.6	13.2	0.91
粉土	25.8	1.91	26.5	14.0	8.5	1.39
粉砂	21.3	1.97	—	—	—	—

表 2 DDS-70 型动三轴仪技术参数

Table 2 Technical parameters of dynamic triaxial instrument

最大动轴 力/N	侧向压力/ MPa	反压/ MPa	频率/ Hz	最大轴向位移/ mm
1370	0~0.6	0~0.3	≤10	20

2 试验结果分析

2.1 动强度与破坏振次的关系

动三轴试验得到的土体动强度一般通过循环轴向动应力幅值的一半 $\sigma_d/2$ 和相应的破坏振次 N_f 之间建立关系来表示, 即 σ_d -lg N_f 曲线; 或者是建立循环剪应力比 CSR 和相应破坏振次 N_f 的关系, 即 $\sigma_d/2\sigma'_0$ -lg N_f 曲线。该曲线可用幂函数式的关系曲线拟合,

$$CSR = AN_f^{-B}$$

(1)

式中: A, B 为试验参数。

试验得到循环剪应力比 CSR 与破坏振次 N_f 拟合关系见图 1~3, 动强度与破坏振次的关系可以用幂函数式 (1) 较好地拟合, 其中, A, B 为试验参数, 可由试验曲线拟合得到。但拟合参数 A, B 不是常数, 会随试验土性、围压的不同而变化。试验条件相同时, 粉砂动强度表现明显高于粉土和粉质黏土, 粉土次之, 粉质黏土最低; 也就是循环剪应力比一定时, 粉砂的破坏振次最高、粉土其次、粉质黏土最少。围压 50 kPa 时, 粉砂的动强度略大于粉土, 随着围压的增加, 粉砂强度增加幅度大于粉土。对于这 3 类土, 粉质黏土细颗粒所占比例最大, 粉土次之, 粉砂最少, 粗颗粒

含量则相反。细颗粒占比高，意味着颗粒间的黏聚力高，粗颗粒占比高，意味着颗粒间的摩擦力大，但细颗粒产生的黏聚力对动强度贡献显然小于粗颗粒产生的摩擦力贡献。显然，细颗粒间的摩擦力显著小于粗颗粒间的摩擦力。因此，粉砂的动强度大于粉土和粉质黏土。

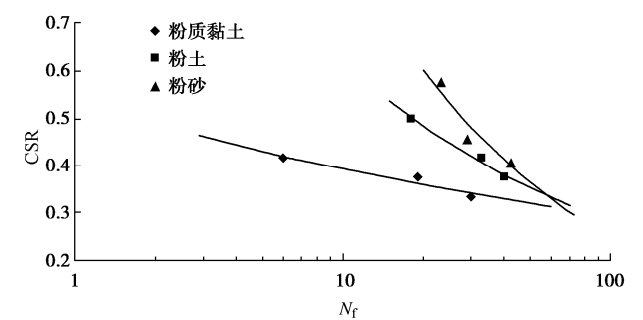


图 1 CSR 与 N_f 关系曲线 ($\sigma_3=50$ kPa)

Fig. 1 Relationship between CSR and N_f ($\sigma_3=50$ kPa)

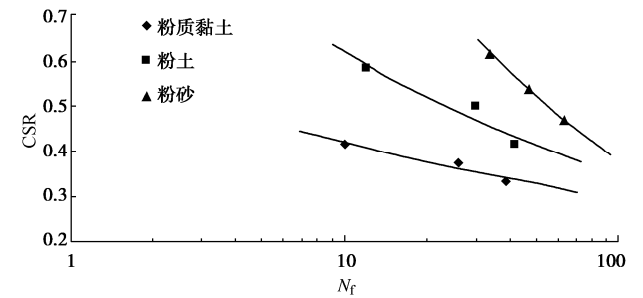


图 2 CSR 与 N_f 关系曲线 ($\sigma_3=100$ kPa)

Fig. 2 Relationship between CSR and N_f ($\sigma_3=100$ kPa)

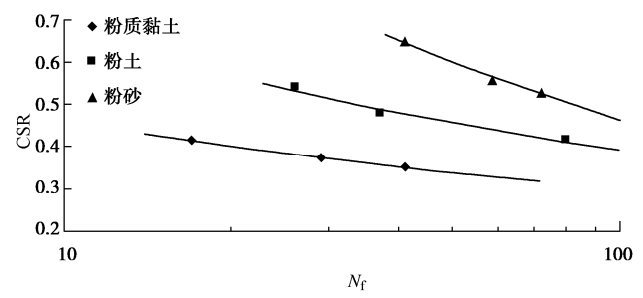


图 3 CSR 与 N_f 关系曲线 ($\sigma_3=200$ kPa)

Fig. 3 Relationship between CSR and N_f ($\sigma_3=200$ kPa)

2.2 动强度与破坏振次的关系

图 4~6 为等压固结剪切时振动拟合曲线，可以看出，土体在动荷载作用下，剪切过程中孔隙水压力都在不断增加，但始终没有达到初始的围压数值，粉质黏土和粉土在剪切过程中的孔隙水压力可达到初始围压的 80% 左右，粉砂在达到破坏标准时，孔隙水压力约为初始孔压的 60%~70%。直至应变达到 5% 的破坏标准时，孔压达到最大，趋于基本稳定。

试验中的动孔压比 u_d/σ_3 与振次比 N/N_f 关系可用幂函数较好的拟合：

$$\frac{u_d}{\sigma_3}=a\left(\frac{N}{N_f}\right)^b。$$

(2)

式中， u_d 为振动 N 次的动孔压； σ_3 为试验施加的围压； N_f 为破坏振次，也可取试验停止时的振次； a ， b 为曲线拟合参数。通过试验曲线拟合发现， a ， b 不是常数，至少与土性有关，拟合参数见表 3。

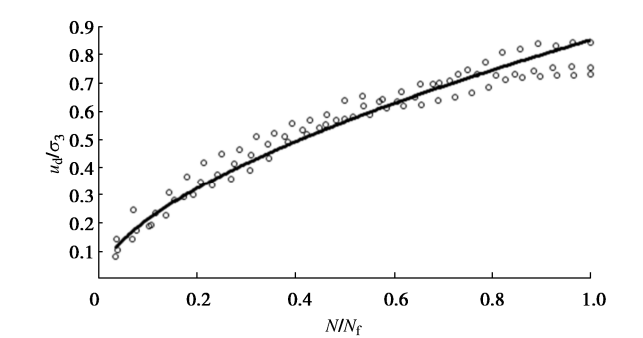


图 4 粉质黏土的动孔压比与振次比拟合关系

Fig. 4 Fitting relationship between dynamic pore water pressure ratio and vibration frequency ratio of silty clay

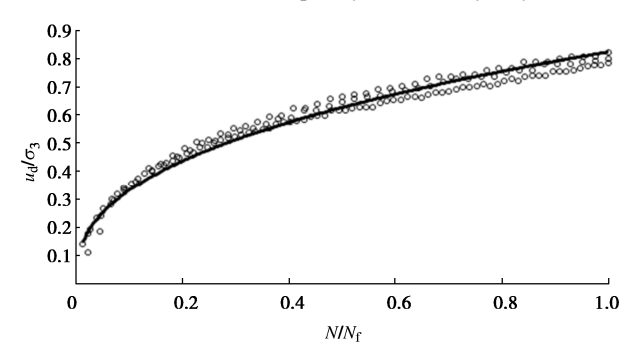


图 5 粉土的动孔压比与振次比拟合关系

Fig. 5 Fitting relationship between dynamic pore water pressure ratio and vibration frequency ratio of silt

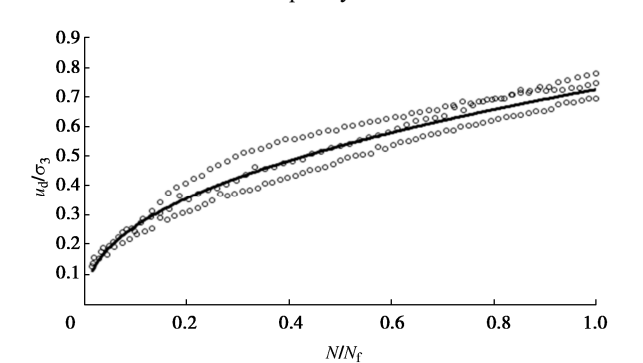


图 6 粉砂的动孔压比与振次比拟合关系

Fig. 6 Fitting relationship between dynamic pore water pressure ratio and vibration frequency ratio of silty sand

表 3 不同土类的拟合参数

Table 3 Fitting parameters of different soil types

土类	拟合参数 a	拟合参数 b	相关系数 R
粉质黏土	0.855	0.598	0.955
粉土	0.825	0.391	0.980
粉砂	0.727	0.440	0.942

同时发现, u_d/σ_3 与 N/N_f 关系也可用对数函数拟合。对于本次试验结果, 式(2)的幂函数拟合效果更好, 幂函数拟合相关系数更高。

虽然动孔压发展模式能用幂函数较好地拟合, 但拟合参数不是常数, 至少与土性有关, 还可能受动荷载等条件的影响。孔压应力模型中的经典模型是Seed等^[7]在等压固结不排水条件下提出的关系式:

$$\frac{u}{\sigma'_0} = \frac{2}{\pi} \arcsin \left(\frac{N}{N_L} \right)^{1/2\theta} \quad (3)$$

式中: σ'_0 为有效围压; N 为振次; N_L 为破坏振次; θ 为与土性相关的试验参数。

张建民等^[5]、陈国兴等^[6]、曾长女等^[8]研究了粉土的动孔压发展模式, 分别提出了改进的拟合关系式, 都能够较好地拟合粉土的 u_d/σ_3 与 N/N_f 关系, 但拟合函数都有差别, 拟合参数也随之变化。

2.3 土体在剪切过程中动应变的变化特性

由图7~9可知, 粉质黏土、粉土和粉砂在动荷载作用下, 动应变的发展模式有所不同。剪切过程中, 粉质黏土的压应变一直大于拉应变, 并且是渐变的; 粉土则是压应变与拉应变基本同时发展; 砂土则在开始一段时间, 轴向应变很小, 压应变小于拉应变, 中后期, 轴向应变迅速增长, 压应变逐渐超过了拉应变, 直到受压破坏。

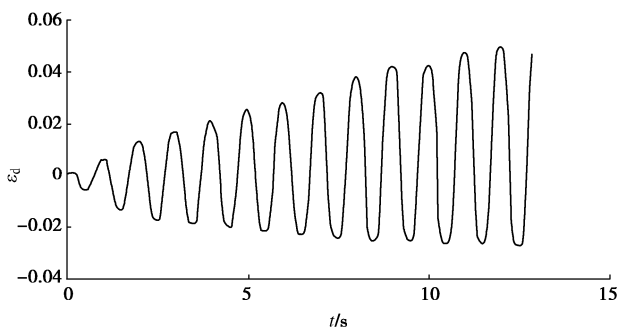


图7 粉质黏土在剪切过程中动应变时程曲线

Fig. 7 Time-history curves of dynamic strain of silty clay

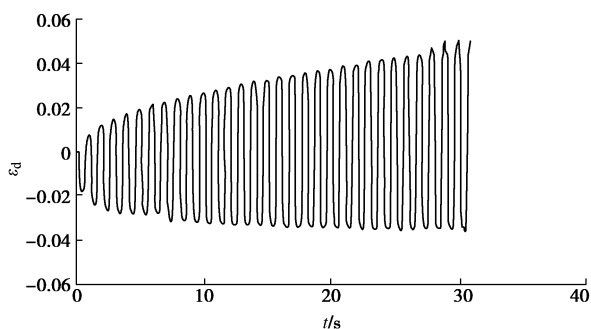


图8 粉土在剪切过程中动应变时程曲线

Fig. 8 Time-history curves of dynamic strain of silt

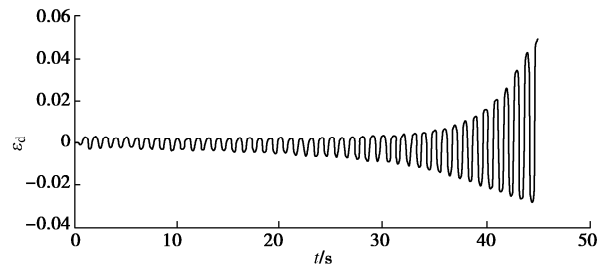


图9 粉砂在剪切过程中动应变时程曲线

Fig. 9 Time-history curves of dynamic strain of silty sand

粉质黏土和粉土细颗粒多, 塑性相对高, 黏聚力大, 土颗粒排列一般较为均匀, 因此应变发展趋势也较为平缓, 是渐变型; 同时, 粉质黏土强度相对低, 在动荷载作用下容易产生压应变; 粉砂的颗粒相对较大, 粗颗粒多, 塑性低, 而且还受颗粒级配和相对密实度影响, 但其力学性质较好, 压缩性低, 模量高, 渗透系数高, 排水性能好, 因此它砂土在循环荷载作用初期, 还未破坏砂土结构, 应变较小, 甚至压应变小于拉应变, 随着动荷载的持续施加, 砂土内部结构随之破坏, 强度急剧降低, 应变也随之迅速增大。

3 结 论

(1) 根据波浪荷载的特征, 对粉质黏土、粉土和粉砂分别做了等压固结不排水剪动三轴试验, 发现循环剪应力比与破坏振次可以用幂函数较好的拟合, 但拟合参数不是常数, 与土类和围压有关。

(2) 土体在剪切过程中孔隙水压力会不断增加, 但始终没有达到初始的围压数值, 达到破坏标准时, 约为初始围压的 60%~80%; 动孔压比与振次比关系可用幂函数很好的拟合, 拟合参数不是常数, 与土性有关。

(3) 土体在剪切过程的动应变发展模式不同, 粉质黏土的压应变一直大于拉应变, 并且是渐变的; 粉土是压应变与拉应变基本同时发展; 砂土则在开始一段时间, 轴向应变很小, 压应变小于拉应变, 中后期, 轴向应变迅速增长, 压应变逐渐超过了拉应变, 直到破坏标准。

参考文献:

- [1] 刘 丹. 波浪荷载对海洋黏土力学性状影响的试验研究[D]. 南京: 南京水利科学研究院, 2010. (LIU Dan. Experimental Study on the Mechanical Properties of Marine Clay Influenced by Wave Load[D]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2010. (in Chinese))
- [2] 张晨明, 董秀竹, 郭 莹, 等. 波浪荷载作用下砂土变形特性的模拟试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2005, 25(2):

- 155-159. (ZHANG Chenmin, DONG Xiuzhu, GUO Yin, et al. Experimental study on dynamic deformation behavior of sand under wave-induced loading[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2005, **25**(2): 155-159. (in Chinese))
- [3] 孟凡丽, 卢成原, 王姗姗. 波浪荷载下粉质土动应变和动强度的试验研究[J]. 浙江工业大学学报, 2007, **35**(6): 671-674. (MENG Fanli, LU Chengyuan, WANG Sansan. Experimental study on dynamic strain and strength of silt under wave load[J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2007, **35**(6): 671-674. (in Chinese))
- [4] 闫澍旺, 封晓伟. 天津港软黏土强度循环弱化试验研究及应用[J]. 天津大学学报, 2010, **43**(11): 943-948. (YAN Shuwang, FENG Xiaowei. Test on strength cyclic softening of Tianjin harbor soft clay and its application[J]. Journal of Tianjin University, 2010, **43**(11): 943-948. (in Chinese))
- [5] 张建民, 王稳祥. 振动频率对饱和砂土动力特性的影响[J]. 岩土工程学报, 1990, **12**(1): 89-97. (ZHANG Jianmin, WANG Wenxiang. Effect of vibration frequency on dynamic behavior of saturated sand[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1990, **12**(1): 89-97. (in Chinese))
- [6] 陈国兴, 刘雪珠. 南京粉质黏土与粉砂互层土及粉细砂的振动孔压发展规律研究[J]. 岩土工程学报, 2004, **26**(1): 79-82. (CHEN Guoxing, LIU Xuezhu. Study on dynamic pore water pressure in silty clay inter bedded with fine sand of nanjing[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, **26**(1): 79-82. (in Chinese))
- [7] SEED H B, LEE K L. Liquefaction of saturated sands during cyclic loading[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Divisions, ASCE, 1966, **92**(6): 105-34.
- [8] 曾长女, 刘汉龙, 丰土根, 等. 饱和粉土孔隙水压力性状试验研究[J]. 岩土力学, 2005, **26**(12): 1963-1966. (ZENG Changnü, LIU Hanlong, FENG Tugen, et al. Test study on pore water pressure mode of saturated silt[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, **26**(12): 1963-1966. (in Chinese))
- [9] 郭莹, 贺林. 振动频率对饱和砂土液化强度的影响[J]. 防灾减灾工程学报, 2009, **29**(6): 618-623. (GUO Ying, HE Lin. The influences of vibration frequencies on liquefaction strength of saturated sands[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2009, **29**(6): 618-623. (in Chinese))
- [10] 张健, 高玉峰, 沈扬, 等. 波浪荷载作用下饱和粉土反正弦孔压拟合参数影响因素分析[J]. 岩土力学, 2011, **32**(3): 727-732. (ZHANG Jian, GAO Yufeng, SHEN Yang, et al. Factor analysis of fitting parameter for saturated silt arcsin pore water pressure under wave loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(3): 727-732. (in Chinese))

(编校: 孙振远)