

DOI: 10.11779/CJGE2021S1043

动荷载下填方体压实黄土动应变与动孔压变化规律研究

代倩^{1,2}, 廖红建^{*1}, 康孝森³, 董琪⁴

(1. 西安交通大学土木工程系, 陕西 西安 710049; 2. 西安交通大学城市学院, 陕西 西安 710018; 3. 长安大学地质工程系, 陕西 西安 710064; 4. 陕西科技控股集团有限责任公司, 陕西 西安 710077)

摘要:某黄土填方体不同深度含水率差异明显,部分层位体积含水率达到50%,高含水率影响该填方体在长期动荷载作用下的变形与应力状态,需开展动荷载下填方体压实黄土动应变与动孔压变化研究。制备接近填方体实际干密实度的三轴试样,开展不同围压与不同循环应力比条件下饱和压实黄土动三轴试验,研究循环应力比与循环次数对饱和压实黄土塑性应变累积、应变变化率、应变幅值、孔压累积、孔压变化率与孔压幅值的影响规律,进一步基于边界面塑性理论揭示循环应力比和围压的这一影响机制。研究结果有利于黄土填方体动力分析,对该高填方体长期变形评估具有重要参考意义。

关键词:黄土高填方; 压实黄土; 动三轴试验; 动孔压; 动应变

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2021)S1-0235-06

作者简介:代倩(1989—),女,博士研究生,主要从事黄土强度变形方面的试验研究。E-mail: daiqian68@stu.xjtu.edu.cn。

Behaviors of dynamic strain and pore pressure of compacted loess in loess-filled foundation induced by dynamic loading

DAI Qian^{1,2}, LIAO Hong-jian¹, KANG Xiao-sen³, DONG Qi⁴

(1. Department of Civil Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Xi'an Jiaotong University College, Xi'an 710018, China; 3. Department of Geological Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 4. Shaanxi Science and Technology Holding Group, Xi'an 710077, China)

Abstract: The water content of different layers is various in a typical high loess-filled foundation. The water content of some layers even comes to 50%, which may greatly affect the strain and stress state of the high loess-filled foundation under dynamic loading. Thus, it's necessary to study the dynamic strain and pore pressure of the compacted loess in the high loess-filled foundation. The compacted loess samples are made according to the actual dry density of the filled-loess foundation, then series of dynamic triaxial tests are conducted on the compacted loess samples subjected to different confining pressures and cyclic stress ratios. Based on the test results, the influences of cyclic stress ratio and cyclic number on deviatoric strain, deviatoric strain rate, deviatoric strain amplitude, pore pressure, pore pressure rate, and pore pressure amplitude are analyzed. The influences are further explored in the framework of the bounding surface plasticity theory. The conclusions are meaningful in analyzing the high filled-loess foundation under dynamic loading and in evaluating the deformation of the loess-filled foundation.

Key words: high loess-filled foundation; compacted loess; dynamic triaxial test; dynamic pore pressure; dynamic strain

0 引言

陕西某黄土高填方沉降主要受施工速度、填方厚度、沟谷形状、压实度和时间等影响^[1],目前该填方体沉降已稳定^[2]。现场监测发现主沟与支沟填土体内不同深度土体有大量水分滞留,不同深度土层含水率差异明显,部分层位体积含水率达到50%^[3],在经历数次不同震级地震荷载作用或不同幅值交通荷载作用后,可能产生一定的变形及孔压累积,需研究这一变形规律及其机理,为该黄土高填方长期变形监测提供依

据。已有学者通过动三轴试验揭示了非饱和或饱和黄土的微观结构演化^[4]、液化特性^[4]、孔压累积^[4-5]、应变累积^[6-8]、骨干曲线^[9-10]、动剪切模量与阻尼比^[11-13]、动强度^[12,14-15]、振陷特征^[16]。

虽然上述研究已揭示了循环加载条件下黄土的变

基金项目:陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2020JQ-988);国家自然科学基金项目(51879212, 41630639);陕西省重点研发计划项目(2019KWZ-09);中央高校基金项目(300102261303)

收稿日期: 2020-12-15

***通信作者**(E-mail: hjliao@mail.xjtu.edu.cn)

形与孔压规律,但所研究土样矿物成分、级配、密实度不同于该高填方体黄土,不能直接应用于分析该黄土高填方体变形,需要开展该高填方压实黄土动三轴试验研究。首先,于该黄土高填方区取土,制备接近填方体设计干密度的压实黄土样;其次,采用 GDS 动三轴仪开展不同围压和不同循环应力比条件下压实黄土应变与孔压变化规律研究;最后,基于边界面塑性理论分析该压实黄土动应变与孔压变化机理,为黄土高填方长期变形的监测与评估提供一定的参考。

1 试样制备与试验方案

试验用土取自该高填方北侧斜坡坡脚,见图 1。该黄土小于 0.005 mm 粒径占 20%,小于 0.075 mm 粒径占 78.3%,相对质量密度 2.72,天然含水率 12.8%,最优含水率 15.6%,最大干密度 1.74 g/cm³,液限 26.3%,塑限 15.4%,塑性指数 10.9,属于粉质黄土。土样经碾压、风干、过筛,配置初始含水率 14.0% 湿土料,将土料置于保鲜袋 48 h 以上。采用分层击实法制备出高 80 mm、直径 39.1 mm 试样。该黄土最大干密度 1.71 ~ 1.74 g/cm³,考虑到该黄土高填方设计压实系数 0.93,故制备试样时控制干密度 1.60 g/cm³ ± 0.02 g/cm³。

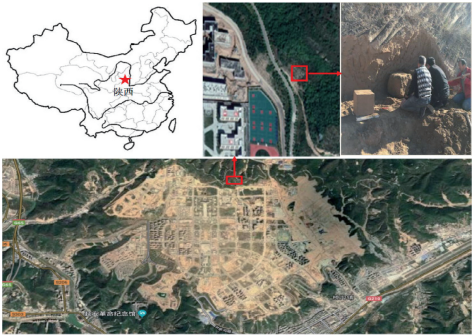


图 1 黄土取样点

Fig. 1 Sampling location of loess

试样在无气水中浸泡 96 h,反压饱和使 $B \geq 95\%$,固结 24 h 至体变稳定且孔压消散;采用 GDS 动三轴仪(最大频率 5 Hz,最大轴向力 20 kN)开展不同循环应力比条件下饱和压实黄土动三轴试验。由于该填方体竖向土压力与填方高度近似线性关系,竖向土压力范围为 0 ~ 400 kPa^[17],故本试验设计有效围压 σ'_c 分别为 200,300,400 kPa,设计轴向动应力 σ_d 不同值,即循环应力比($CSR = \sigma_d/2\sigma'_c$)分别为 0.350,0.425,0.450。轴向动荷载采用正弦等幅循环荷载,激振频率 1 Hz,循环加载 1000 次。选取 5% 偏应变破坏标准^[12]。为分析偏应变与孔压随循环次数的变化规律,设定最大循环次数 $N_m = 10^3$,循环次数 N ,则 $N/N_m \in$

[0 1]。塑性偏应变 ϵ_d^{per} 、塑性偏应变变化率 $d\epsilon_d^{per}$ 、累积孔隙水压力 u^{per} 、孔压变化率 du^{per} 、应变幅值 A_s 与孔压幅值 A_p 见图 2。

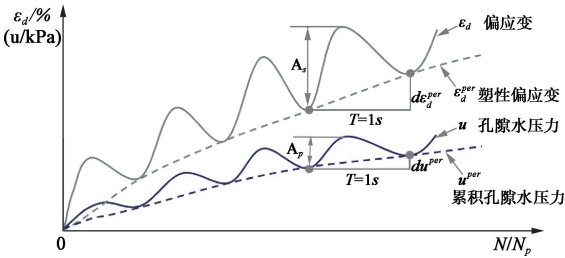


图 2 基本指标的确定

Fig. 2 Determination of basic indices

2 试验结果分析

2.1 塑性偏应变随循环次数变化规律

塑性偏应变随着循环应力比 CSR 的增大而增大(图 3)。这一规律同 Hu 等研究结果一致^[8]。当 CSR = 0.450 时塑性偏应变激增(图 3(b),(c)),试样易产生破坏,当 CSR = 0.350 时试样塑性偏应变小于 2%。表明压实黄土在较大循环应力比 CSR 条件下容

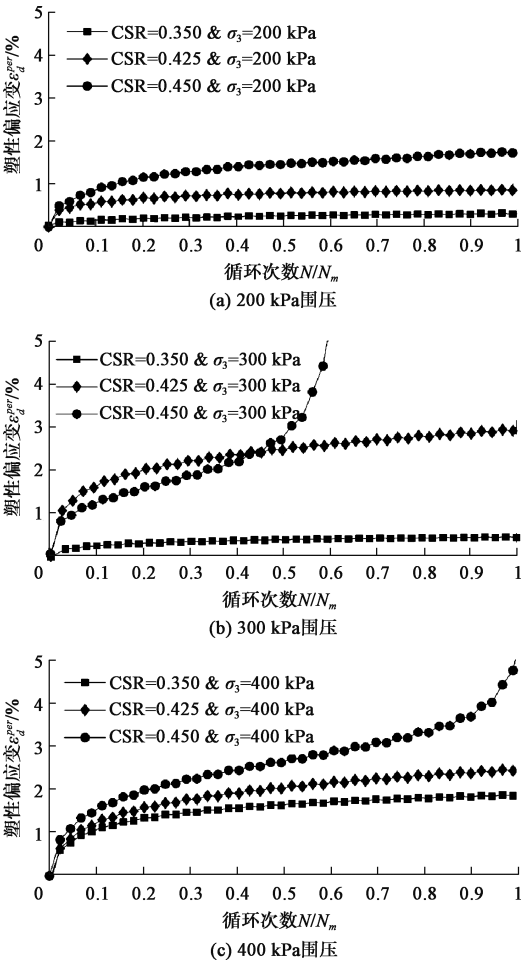


图 3 压实黄土塑性偏应变与循环次数关系

Fig. 3 Relationship between plastic deviatoric strain and cyclic number of compacted loess

易发生破坏。通过控制循环应力比幅值在较小的范围内,有利于消减填方体长期塑性应变累积。

塑性偏应变变化率存在 3 个阶段:骤减阶段,稳定阶段,缓增阶段(图 4)。例如 300 kPa 围压条件下,当 $N/N_m < 0.1$ 时,塑性偏应变变化率骤减;当 $0.1 < N/N_m < 0.5$ 时,塑性偏应变变化率基本稳定在 $0 \sim 0.2 \times 10^{-4}$;当 $N/N_m > 0.5$ 时,塑性偏应变变化率逐渐增大。循环应力比 CSR 较小时,塑性偏应变变化率最终会稳定在较小值。在较小动荷载作用下,该填方体压实黄土塑性偏应变变化率没有缓增阶段,处于稳定状态。

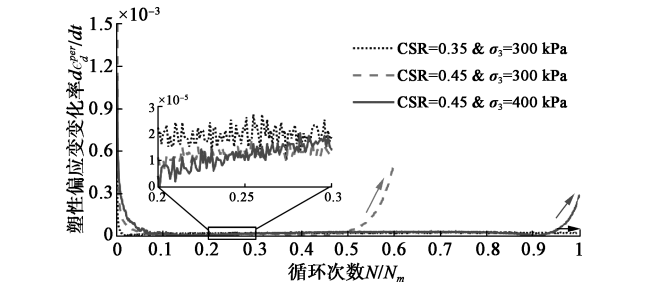


图 4 塑性偏应变变化率与循环次数关系

Fig. 4 Relationship between plastic deviatoric strain rate and cyclic number

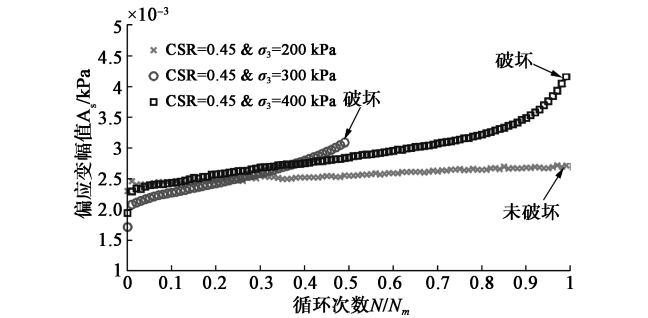


图 5 偏应变波动幅值与循环次数关系

Fig. 5 Relationship between amplitude of plastic deviatoric strain and cyclic number

2.2 孔隙水压力随循环次数的变化规律

不同围压与不同循环应力比条件下,孔压均随着循环次数增大而累积(图 6)。主要是由于循环次数越大对黄土颗粒的扰动愈明显,试样产生剪切或者鼓胀变形,颗粒发生更为显著的重组排列,并逐渐趋向于液化发展。孔隙水压力变化率随着循环次数增大而减小,且与循环应力比 CSR 相关(图 7)。

孔隙水压力变化率初值受循环应力比 CSR 控制,当 CSR = 0.45 时变化率初值接近 0.7,当 CSR = 0.35 时变化率初值接近 0.1。并且存在某一临界循环次数 100,小于该值时,孔隙水压力变化率呈现骤降;大于该值后,孔隙水压力变化率则较小。孔压波动幅值随循环应力比增大而增大,破坏时孔压幅值较大(图 8)。

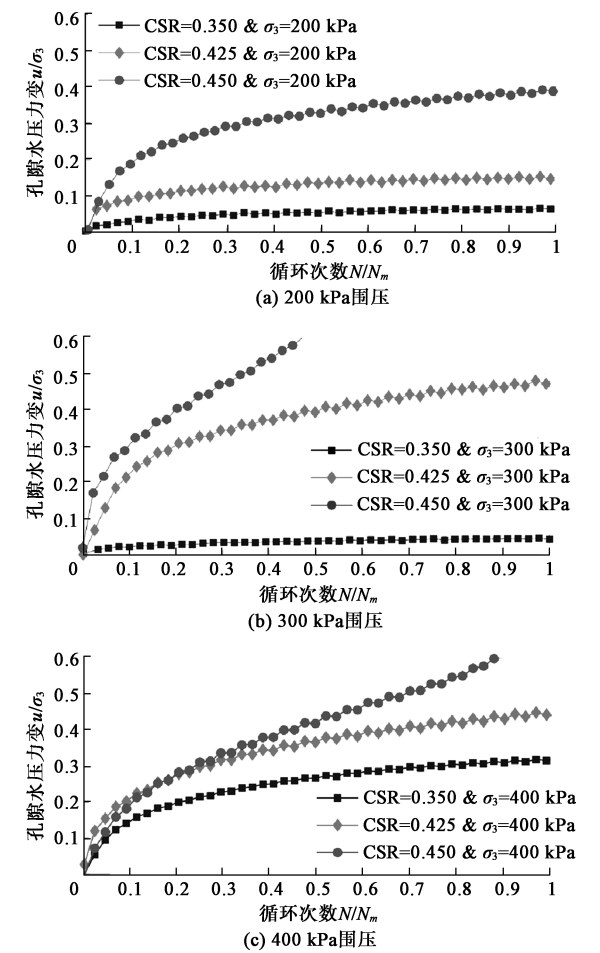


图 6 不同循环应力比下压实黄土孔隙水压力与循环次数

Fig. 6 Pore pressures and cyclic number of compacted loess subjected to different CSRs

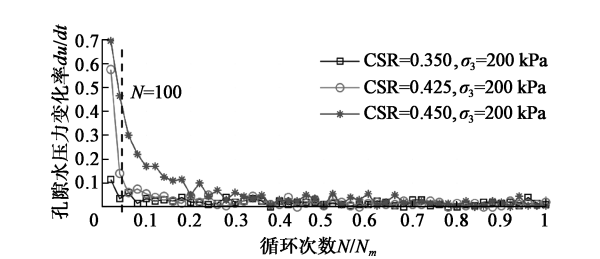


图 7 孔压变化率与循环次数关系

Fig. 7 Relationship between rate of pore pressure and cyclic number

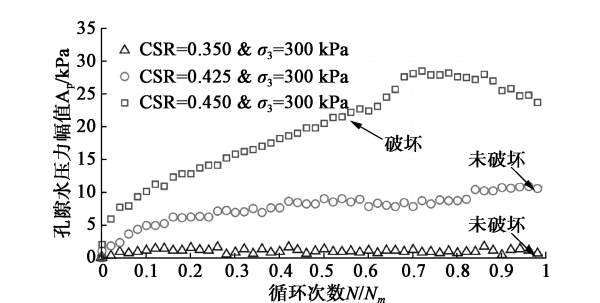


图 8 孔压波动幅值与循环次数关系

Fig. 8 Relationship between amplitude of pore pressure and cyclic number

3 试验结果讨论

基于边界面塑性理论分析上述行为。边界面塑性理论中边界面是有效应力状态域的边界^[18],域内有效应力状态遵循一定的映射法则,即 $\delta = \delta_1 / (\delta_1 + \delta_0)$, δ_1 为当前应力至像应力的距离, δ_0 为当前应力至映射中心的距离(图 9)。塑性模量是该映射法则的泛函($H(\delta)$),由此产生相应的塑性应变增量 $\dot{\epsilon}^p$ ($1/H$),反映循环加载路径下的塑性应变累积^[19]。单次加载中,应力由 A 点至 B 点时塑性模量非线性衰减^[19](图 10);循环加载中,循环应力比 CSR 越大,动杨氏模量 E_d 越小(图 11),改变应力-应变滞回规律^[18],导致塑性模量 $H(\delta)$ 减小,产生塑性应变增量 $\dot{\epsilon}^p$ ($1/H$)较大。

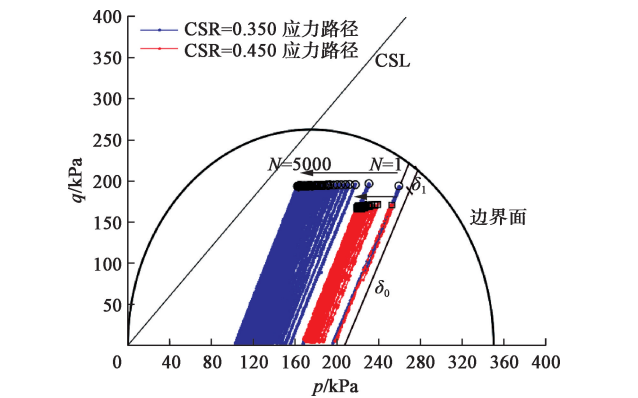


图 9 有效应力路径与边界面和临界状态线的关系
Fig. 9 Relationship among effective stress paths, bounding surface and critical state line

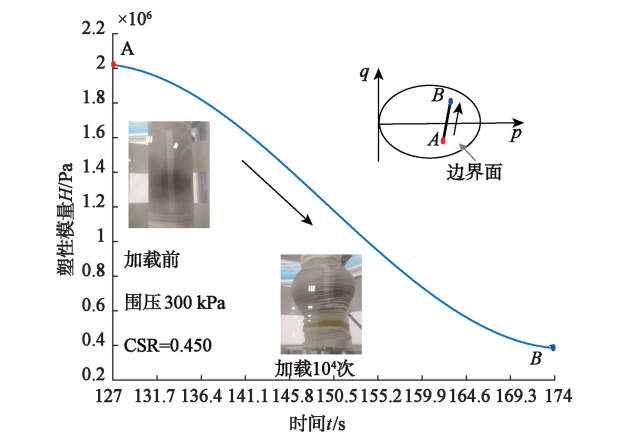


图 10 半周期内塑性模量变化
Fig. 10 Change of plastic modulus in half cyclic number

该填方体压实黄土偏应变与孔隙水压力变化对循环应力比 CSR 很敏感,尤其当 CSR 达到 0.425 时偏应变与孔隙水压力易激增,有效应力降低迅速,这与压实黄土塑性模量 $H(\delta)$ 演化关系密切。而塑性模量与边界面和临界状态线有关(图 9)。一方面,CSR = 0.450 时有效应力点接近边界面(δ 较小),塑性模量 $H(\delta)$ 较小,塑性应变增量 $\dot{\epsilon}^p$ ($1/H$)较大;CSR = 0.350 时有效应力点远离边界面(δ 较大),塑性模量 $H(\delta)$ 较大,塑

性应变增量 $\dot{\epsilon}^p$ ($1/H$)较小。另一方面,CSR = 0.350 或 0.450 时,随着循环次数的增大,有效应力状态逐渐接近临界状态线 CSL。例如循环应力比 CSR = 0.450 条件下,循环加载 600 次时试样达到 5% 应变破坏条件(图 3(b)),此刻孔隙水压力大于 $0.6\sigma_3$,循环加载 10^4 次时偏应变已超过 20%,试样发生了显著的轴向压缩与侧向鼓胀变形(图 10)。因此,循环应力比 CSR 越大则塑性应变累积愈显著,有效应力逐渐减小,孔隙水压力逐渐增大。

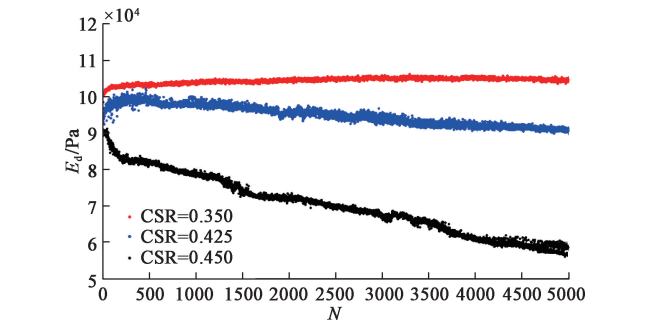


图 11 动杨氏模量与循环加载次数关系
Fig. 11 Relationship between dynamic Young's modulus and cyclic number

随着孔压增加(图 6),孔压变化率逐渐减小(图 7),有效应力状态快速向临界状态线 CSL 移动,移动的速率逐渐减小,直至达到稳定状态,偏应变累积稳定(图 3),偏应变变化率达到稳定(图 4)。但仅是 CSR 较小时存在这一稳定状态,当 CSR 较大时这一稳定状态不存在。临界压力比 CSR 越大,有效应力状态越接近 CSL 线,团粒逐渐破坏且土颗粒旋转,初始结构性逐渐发生破坏,粉粒易达到液化状态,循环加载一定次数后,孔压激增(图 6),偏应变急剧增大(图 4),越容易发生破坏。

值得注意的是,不同围压条件下循环应力比对孔压影响不同。当围压由 200 kPa 增大至 400 kPa,而孔压增大了 3 倍,偏应变增大了几十倍。这表明,相同循环应力比条件下,孔压和偏应变累积规律不一致,且具有围压依赖性,尤其是在循环应力比较大时愈显著(图 12)。这也反映了填方体压实黄土经历不同震级

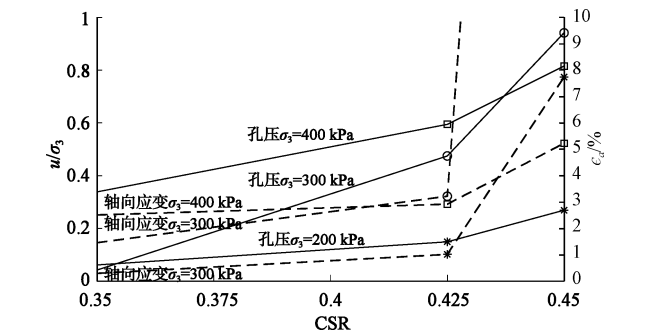


图 12 循环应力比对孔压和偏应变的影响
Fig. 12 Influences of cyclic stress ratio on pore pressure and plastic deviatoric strain

地震荷载或长期交通荷载作用后,所产生的应变和孔压累积与围压关系密切。动本构模型中塑性模量 $H(\delta)$ 需考虑这一性质。

4 结 论

为研究某高填方体压实黄土动应变与孔压,开展了不同围压与不同循环应力比条件下压实黄土动三轴试验,进一步基于边界面塑性理论分析讨论了变形与孔压累积机制,得出以下主要结论:

(1) 循环应力比越大,偏应变增量越大,孔隙水压力增量越大;偏应变幅值与孔压幅值随循环次数变化而增大。偏应变与孔压这一规律与塑性模量有关。

(2) 偏应变率具有 3 个阶段:骤减、稳定与缓增。孔压变化率具有两个阶段:骤减与稳定。孔压越大,其变化率越小,有效应力向临界状态线移动,直至孔压与应变稳定。仅当循环应力比不大时存在这一稳定状态。

(3) 有效应力点至边界面的距离与塑性模量具有非线性关系,而试验结果表明这一非线性关系还具有围压依赖性,需在黄土高填方计算分析中考虑。

(4) 填方体压实黄土经历地震荷载或长期交通荷载作用后,可能产生不同程度的偏应变与孔压累积。上述结果对黄土填方体长期变形评估具有重要的参考意义。

参考文献:

- [1] 郑建国, 曹 杰, 张继文, 等. 基于离心模型试验的黄土高填方沉降影响因素分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, **38**(3): 560 – 571. (ZHENG Jian-guo, CAO Jie, ZHANG Ji-wen, et al. Analysis of influencing factors of high loess-filled foundations based on centrifugal model tests [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, **38**(3): 560 – 571. (in Chinese))
- [2] 葛苗苗, 李 宁, 张 炜, 等. 黄土高填方沉降规律分析及工后沉降反演预测[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, **36**(3): 745 – 753. (GE Miao-miao, LI Ning, ZHANG Wei, et al. Settlement behavior and inverse prediction of post-construction settlement of high filled loess embankment[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, **36**(3): 745 – 753. (in Chinese))
- [3] 段 旭, 董 琪, 门玉明, 等. 黄土沟壑高填方工后地下水与土体含水率变化研究[J]. 岩土工程学报, 2018, **40**(9): 1753 – 1758. (DUAN Xu, DONG Qi, MEN Yu-ming, et al. Change of groundwater and water content of loess high fill in gully regions [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, **40**(9): 1753 – 1758. (in Chinese))
- [4] 王兰民, 刘红玫, 李 兰, 等. 饱和黄土液化机理与特性的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2000, **22**(1): 92 – 97.

- (WANG Lan-min, LIU Hong-mei, LI Lan, et al. Laboratory study on the mechanism and behaviors of saturated loess liquefaction [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, **22**(1): 89 – 94. (in Chinese))
- [5] 骆亚生, 李 瑞, 田堪良. 非饱和黄土动力特性试验方法研究[J]. 地下空间与工程学报, 2007(6): 1041 – 1046. (LUO Ya-sheng, LI Rui, TIAN Kan-liang. Research on method of dynamic characteristics tests for unsaturated loess [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007(6): 1041 – 1046. (in Chinese))
- [6] 孙海妹, 王兰民, 王 平, 等. 振动荷载作用下黄土应变增长特征试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2011, **7**(6): 1103 – 1107. (SUN Hai-mei, WANG Lan-min, WANG Ping, et al. Experimental study on the deformation characteristics of loess under cyclic load[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2011, **7**(6): 1103 – 1107. (in Chinese))
- [7] WANG S, ZHONG Z L, LIU X R, et al. Influences of principal stress rotation on the deformation of saturated loess under traffic loading[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2019, **23**(5): 2036 – 2048.
- [8] HU Z P, WANG R, REN X, et al. Permanent deformation behavior of compacted loess under long-term traffic loading [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2019, **31**(8): 04019157.
- [9] 廖红建, 肖正华, 刘 健. 动载下饱和重塑黄土的骨干曲线变化研究[J]. 岩土力学, 2011, **32**(2): 375 – 379. (LIAO Hong-jian, XIAO Zheng-hua, LIU Jian. Study of variation of backbone curve of saturated remolded loess under dynamic loading. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(2): 375 – 379 (in Chinese))
- [10] XIAO Z H, HAN B, LIAO H J, et al. Experiment study on dynamic strength of loess under repeated load [J]. International Journal of Modern Physics B, Singapore, 2008, **22**(31/32): 5825 – 5830.
- [11] 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 Jin-lian, MA Hai-ping, et al. Dynamic shear modulus and damping ratio of saturated loess[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, **38**(9): 1919 – 1927. (in Chinese))
- [12] ZHANG Z L, WANG T, WU S R, et al. Dynamics stress-strain behavior of Tianshui soils[J]. Landslides, 2017, **14**(1): 323 – 335.
- [13] SONG B H, TSINARIS A, ANASTASIADIS A, et al. Small-strain stiffness and damping of Lanzhou loess [J]. Soil Dynamics & Earthquake Engineering, 2017, **95**: 96 – 105.
- [14] 杨利国, 骆亚生, 李 焱, 等. 初始应力条件对压实黄土动强度影响的研究[J]. 岩土力学, 2010, **31**(1): 87 – 91. (YANG Li-guo, LUO Ya-sheng, LI Yan, et al. Research

on effect of initial stress conditions on dynamic strength of compacted loess [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, **31** (1): 87 – 92. (in Chinese))

[15] 王军海, 刘亚明. 基于动三轴试验的压实黄土动强度特性研究 [J]. *地震工程学报*, 2016, **38** (3): 439 – 444. (WANG Jun-hai, LIU Ya-ming. Dynamic strength properties of compacted loess based on dynamic triaxial test [J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 2016, **38** (3): 439 – 444. (in Chinese))

[16] 刘保健, 张晓荣, 程海涛. 应变控制下压实黄土的动三轴试验研究 [J]. *岩土力学*, 2007 (6): 1073 – 1076. (LIU Bao-jian, ZHANG Xiao-rong, CHENG Hai-tao. Study on compacted loess under strain control at dynamic triaxial test [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, **28** (6): 1073 – 1076. (in Chinese))

[17] 段旭, 门玉明, 董 琪, 等. 黄土沟壑高填方分层沉降监测与深层浸水试验 [J]. *水土保持通报*, 2017, **37** (3): 222 – 226. (DUAN Xu, MENG Yu-ming, DONG Qi, et al. Layered settlement monitoring and soaking test of loess high fill in gully region, 2017, **37** (3): 222 – 226. (in Chinese))

[18] KANG X S, LIAO H J. Bounding surface plasticity model for jointed soft rocks considering overconsolidation and structural decay [J]. *Computers and Geotechnics*, 2019, **108**: 295 – 307.

[19] KANG X S, ZHANG J H, NING C M, LIAO H J. A bounding surface plasticity model for normally consolidated volcanic cohesive soils subjected to cyclic loading [C] // 7th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, 2019, Rome.

(编校: 黄贤沙)