

不同初始干密度黄土与混凝土接触面直剪试验

张磊^{1,2}, 刘慧^{3,4}, 王铁行^{1,2}

(1. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 陕西省岩土与地下空间工程重点实验室, 陕西 西安 710055;
3. 贵州正业工程技术投资有限公司, 贵州 贵阳 550012; 4. 贵州省岩溶地基工程技术研究中心, 贵州 贵阳 550012)

摘要:为提高黄土填方地区基础承载力和沉降计算分析水平,采用大型直剪仪开展了不同初始干密度的重塑黄土与混凝土接触面剪切试验。试验结果表明,随着法向应力的增加,不同土样初始干密度下接触面剪应力-剪切位移曲线由弱软化型逐渐过渡为弱硬化型,最后转变为强硬化型。随着土样初始干密度的增加,接触面剪应力-剪切位移曲线的初始斜率增大,抗剪强度增大,粘聚力先增大再减小,内摩擦角持续增大。土样初始干密度对接触面抗剪强度的影响随法向应力的增加而增大。随着土样初始干密度的减小或法向应力的增加,体应变增大,黄土与混凝土接触面由剪胀逐渐转化为剪缩。

关键词:黄土;接触面;大型直剪试验;初始干密度;抗剪强度

中图分类号:TU 411.3

文献标志码:A

文章编号:1006-7930(2020)03-0384-06

Direct shear test on interface between loess with different initial dry densities and concrete

ZHANG Lei^{1,2}, LIU Hui^{3,4}, WANG Tiehang^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;
2. Shaanxi Key Laboratory of Geotechnical and Underground Space Engineering, Xi'an 710055, China;
3. Guizhou Zhengye Engineering and Investment Incorporation Co. Ltd., Guiyang 550012, China;
4. Guizhou Karst Foundation Engineering Technology Research Center, Guiyang 550012, China)

Abstract: In order to improve the level of calculation and analysis of bearing capacity and settlement of the foundation in loess filling area, shear tests on loess-concrete interface, under various initial dry densities, were performed using a large direct shear apparatus. Test results show that with the increase of the normal stress, the shear stress-shear displacement curve of interface becomes from weak soften form to weak hardening form, and then to strong hardening form. With the increase of the initial dry density of loess, the initial slope of the shear stress-shear displacement curve of interface increases, the shear strength increases, the cohesive force of interface firstly increases and then decreases, while the internal friction angle increases continuously. The influence of the initial dry density of loess on the shear strength of interface becomes more obvious when the normal stress increases. With the decrease of the initial dry density of loess or the increase of the normal stress, the volume strain of interface decreases, and the volume changing rule changes from dilatancy to shrinkage.

Key words: loess; interface; large-scale direct shear tests; initial dry density; shear strength

土与结构物相互作用在桩、堆石坝、挡土墙、地下连续墙等工程中广泛存在,而接触面剪切特性一直是两者相互作用研究的核心问题^[1]。国内外众多学者开展了大量的土与结构物接触面剪切试验,分析了土样含水率^[2]、剪切路径^[3]、泥皮^[4]、土体颗粒级配^[5]、接触面粗糙度^[6]、灌浆压力^[7]等因素对接触面剪应力-剪切位移关系、抗剪强度等的影响,并提出了接触面本构模型^[8]。杨庆光等^[9]

利用自制的锚固体-土接触面剪切装置,开展了红黏土-锚固体接触面剪切试验,发现土体压实度对接触面剪应力影响显著。赵春风等^[10-11]开展了考虑卸荷效应的砂土和黏土与混凝土接触面直剪试验,发现前期固结压力改变了土样密实度,导致法向应力相同而前期固结压力不同时接触面剪切性状明显不同。曹卫平等^[12-13]开展了密砂和松砂与混凝土接触面大型直剪试验,发现密砂与混凝土

收稿日期:2019-09-17 修改稿日期:2020-05-13

基金项目:国家自然科学基金项目(51508455);陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2019JM-232);西安建筑科技大学青年科技基金项目(QN1614)

第一作者:张磊(1981—),男,博士,讲师,主要研究土与结构物相互作用。E-mail: zh888lei@163.com

土接触面剪应力-剪切位移关系表现为软化,并发生剪胀;松砂与混凝土接触面剪应力-剪切位移关系表现为硬化,并发生剪缩。此外,陆勇等^[14]通过对粗粒土与结构物接触面作用机理的研究,认为接触面硬化和软化规律以及剪胀和剪缩特性由土体孔隙比、所受压力、结构面粗糙度等共同决定;干飞等^[15]还通过对红黏土与结构物接触面剪切渐进破坏规律的研究,发现土体压实度和法向应力对其渐进破坏有显著影响。可见,土体干密度对土与结构物接触面剪切性状影响显著,而相关研究目前主要集中在砂土和黏土。

黄土以粉粒为主,其物理力学性质与砂土、黏土等明显不同。另外我国黄土地区丘陵沟壑分布广泛^[16],城市建设过程中平山填沟是获取平整地基的重要手段^[17],而土体干密度是评价填土工程性质的重要指标^[18]。一些学者通过剪切试验分析了土样含水率^[19]、固结条件^[20]等对黄土与结构物接触面剪切性状的影响,但目前尚无考虑土样初始干密度影响的黄土与结构物接触面剪切试验研究。本文利用大型直剪仪开展了黄土与混凝土接触面剪切试验,分析了土样初始干密度、法向应力等因素对接触面剪应力-剪切位移关系、剪切强度、体变规律等的影响,为黄土填方地区基础设计计算提供试验依据。

1 试验仪器及方案

1.1 试验设备

直剪仪操作方便、控制条件明确,在土与结构物接触面剪切试验中应用广泛。如图1所示,本文试验采用美国 Geocomp 公司生产的 Shear Trac-III 型直剪仪。该直剪仪可提供高达 930.25 cm^2 的接触面积,能有效减小尺寸效应和边界效应对试验结果的影响,且下剪切盒比上剪切盒长 100 mm ,剪切过程中接触面积保持不变。试验过程中法向荷载施加、剪切、数据采集等均由电脑软件控制,从而有效避免人为操作产生的误差。

1.2 试样制备

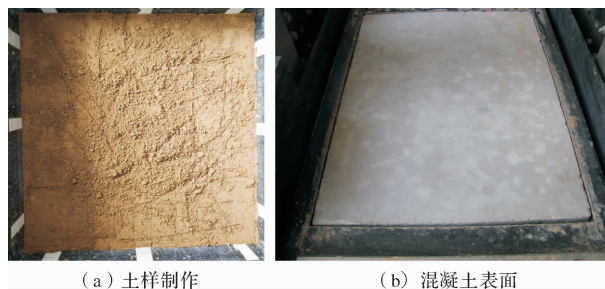
试验用土为上更新统风积黄土,呈褐黄色。土颗粒相对密度为 2.72 ,塑限为 18.0% ,液限为 33.1% ,塑性指数为 15.1 ,击实试验所得最大干密度为 1.79 g/cm^3 ,最优含水率为 16% 。为模拟实际填方情况,使用重塑土样进行试验。参照标准^[21],将风干、碾散的土过 2 mm 筛,按含水率 16% 配置土样,密封后静置 24 h 以上以使水分扩散均匀。装样时将土样放入上剪切盒内分 3 层击

实,通过控制每层土的厚度和质量控制土样干密度,并在每次击实后对土样表面进行刮毛,以保证土样的整体性,如图2(a)所示。混凝土块使用与下剪切盒同尺寸的模板浇筑,强度等级为 C30 ,表面进行人工抹平,养护 28 d 后拆模,得到混凝土表面如图2(b)所示,其最大峰谷距 $<0.2\text{ mm}$ ^[22]。



图1 大型界面直剪仪

Fig. 1 A large direct shear apparatus



(a) 土样制作

(b) 混凝土表面

图2 试样制备

Fig. 2 Sample preparation

1.3 试验步骤

填方工程中,土体压实度受填筑方法和施工质量影响较大。孔洋等^[16]测得延安新区某黄土高填方场地实测压实度为 $(70 \pm 5)\%$,因此选取土体初始干密度为 1.34 g/cm^3 、 1.52 g/cm^3 和 1.70 g/cm^3 ,对应压实度分别为 75% 、 85% 和 95% 。

首先把混凝土块放入下剪切盒,并按上述步骤在上剪切盒内完成装样。在土样顶面放置浸湿滤纸和透水石,并盖上承压板。把上、下剪切盒装到直剪仪上。施加法向力(法向应力分别取为 50 kPa 、 100 kPa 、 200 kPa 、 300 kPa 和 400 kPa)。每隔 15 min 读一次法向位移,当两次读数计算出的沉降速率小于 0.005 mm/h 时,认为试样固结稳定。拔掉固定上下盒的销钉,保持上盒不动,以 0.8 mm/min 的速率移动下盒进行剪切。剪切过程中法向应力保持不变,机载软件自动采集法向位移、剪切力等数据。待剪切位移达到 40 mm 时试验结束。每次试验结束后用清水冲洗混凝土表面并用毛巾吸水,再用吹风机吹干,以保证每次试验混凝土表面清洁度一致。

2 试验结果比较与分析

2.1 接触面剪应力-剪切位移关系

不同法向应力下,不同初始干密度的黄土与混凝土接触面剪应力-剪切位移关系如图3所示。由图3可见,随着法向应力的增加,土样初始干密度 $\rho_d=1.34\text{ g/cm}^3$ 和 1.52 g/cm^3 时接触面剪应力-剪切位移曲线由弱软化型逐渐过渡为弱硬化型最后转变为强硬化型,土样初始干密度 $\rho_d=1.70\text{ g/cm}^3$ 时接触面剪应力-剪切位移曲线基本由弱软化型转变为弱硬化型。接触面剪应力及剪应力-剪切位移曲线的初始斜率一般随黄土初始干密度的增加而增大。剪切位移为40 mm且法向应力为50 kPa

时,当土样初始干密度从 1.34 g/cm^3 增至 1.52 g/cm^3 再增至 1.70 g/cm^3 ,接触面剪应力均明显增加;法向应力为100 kPa时,当土样初始干密度从 1.34 g/cm^3 增至 1.52 g/cm^3 接触面剪应力变化较小,而当土样初始干密度从 1.52 g/cm^3 增至 1.70 g/cm^3 接触面剪应力变化仍较为明显;法向应力增至200 kPa、300 kPa和400 kPa时,本文三种黄土初始干密度下的剪应力相差很小。黄土初始干密度 $\rho_d=1.70\text{ g/cm}^3$ 的剪应力-剪切位移关系曲线均存在较为明显的拐点,在拐点之前曲线斜率很大,拐点之后曲线斜率很小,而初始干密度 $\rho_d=1.34\text{ g/cm}^3$ 和 1.52 g/cm^3 时剪应力-剪切位移关系曲线则表现的较为圆滑。

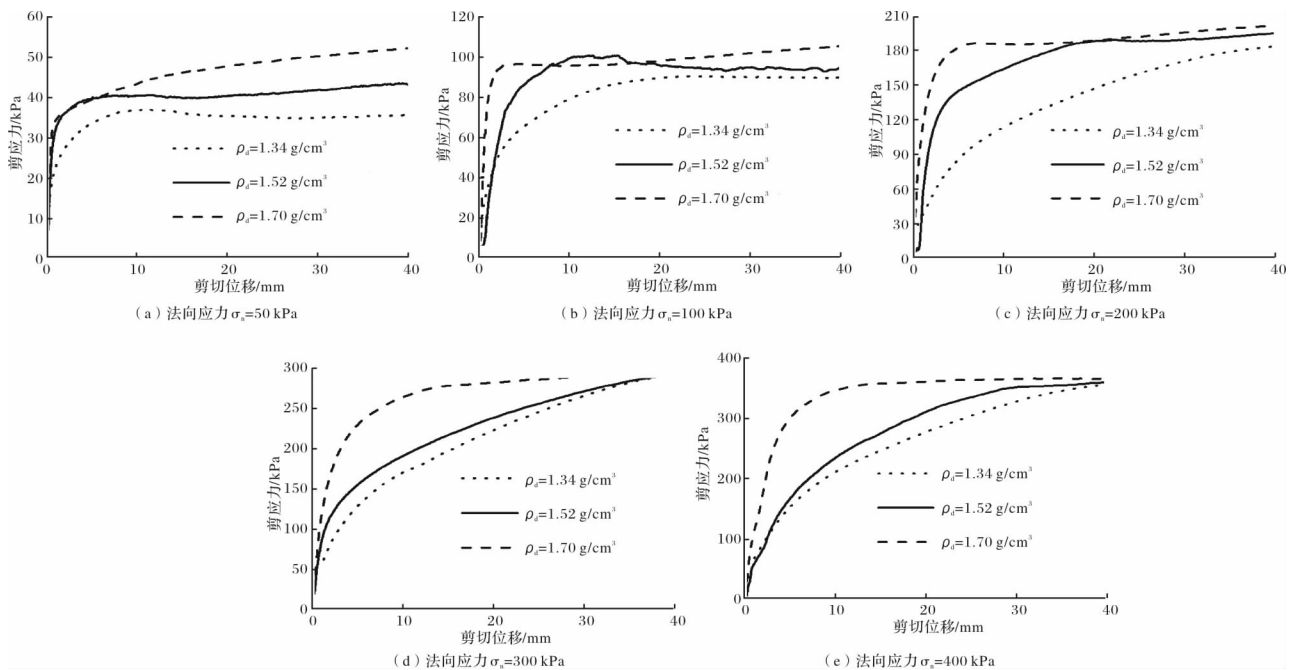


图3 接触面剪应力-剪切位移关系

Fig. 3 Shear stress- shear displacement curves of interface

2.2 接触面强度特性

本文试验结果表明黄土与混凝土接触面剪应力-剪切位移关系分别呈弱软化、弱硬化和强硬化三种形式。借鉴已有研究方法^[12-13],统一取剪切位移为20 mm时的剪应力作为接触面抗剪强度 τ_f 。图4为不同法向应力下接触面抗剪强度与土样初始干密度关系。由图4可见,同一法向应力下,黄土-混凝土接触面抗剪强度均随土样初始干密度的增加而增大。接触面法向应力为50 kPa和100 kPa时,土样初始干密度对接触面抗剪强度影响较小;随着法向应力的增加,土样初始干密度对接触面抗剪强度的影响逐渐增大。

为进一步分析土样初始干密度对接触面抗剪强度的影响,绘出各土样初始干密度下接触面抗

剪强度与法向应力关系如图5所示。由图5可见,不同土样初始干密度下接触面抗剪强度与法向应力存在明显的线性关系,相关系数 R^2 均大于0.99,也即符合摩尔库伦准则,从而得接触面抗剪强度指标如表1所示。由表1可见,随着土样初始干密度的增加,接触面黏聚力先增大后发生明显减小,而接触面内摩擦角持续增大且其变化速率也逐渐增大。

表1 不同接触面试验抗剪强度指标

Tab. 1 Shear strength indexes of loess-concrete interface

抗剪强度指标	初始干密度 $\rho_d / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$		
	1.34	1.52	1.70
黏聚力 c / kPa	11.59	17.03	6.94
摩擦角 $\varphi / ^\circ$	34.14	36.83	41.86

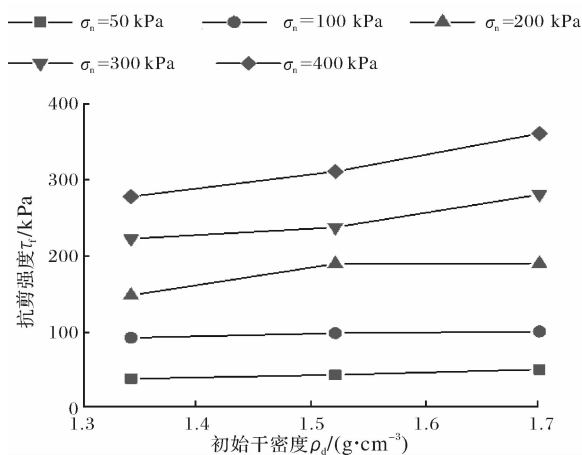


图4 接触面抗剪强度与土样初始干密度关系

Fig. 4 Relationship between shear strength of interface and initial dry density of soil

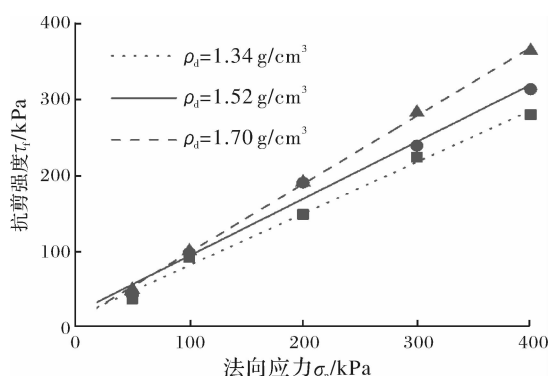


图5 接触面抗剪强度与法向应力关系

Fig. 5 Relationship between shear strength of interface and normal stress

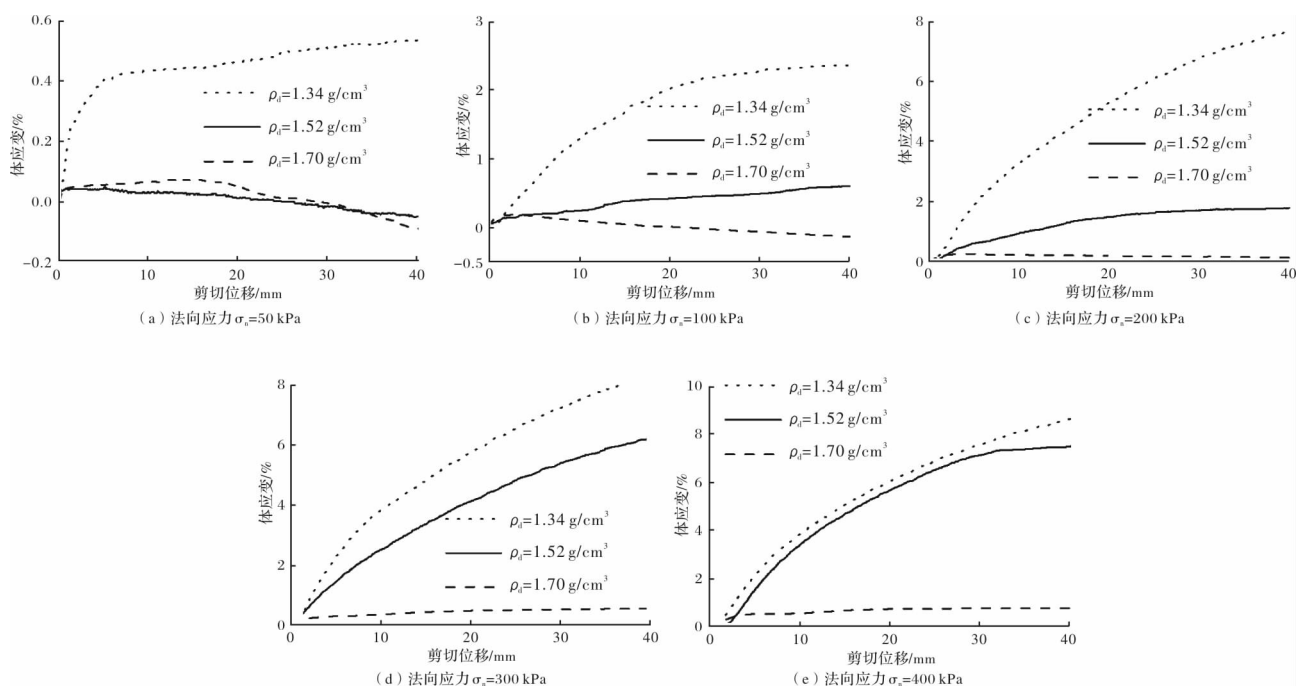


图6 接触面体应变-剪切位移曲线

Fig. 6 Volumetric strain-shear displacement curves of interface

2.3 接触面体变规律

不同法向应力下,不同初始干密度的黄土与混凝土接触面体应变-剪切位移关系如图6所示.本文以体积缩小为正,体积膨胀为负.由图6可见,随着土样初始干密度的减小或法向应力的增加,体应变增大,黄土与混凝土接触面体变规律由剪胀逐渐转化为剪缩.具体为当法向应力 $\sigma_n=50$ kPa、土样初始干密度 $\rho_d=1.52$ g/cm³和 1.70 g/cm³时,及法向应力 $\sigma_n=100$ kPa和 200 kPa、土样初始干密度 $\rho_d=1.70$ g/cm³时,随着剪切位移的增加,土体体积先稍有减小,继而持续增大并最终比剪切前土体体积大,也即发生剪胀;其他条件下,随着剪切位移的增加土样体积持续减小,也即发生剪缩.这是由于土样初始干密度较大时,土体相对比较密实,试样在装样过程中,为达到所要求的干密度,施加了较大的击实功.法向应力较低时,相当于比土样历史上所受到的最大法向应力小,剪切时接触面附近土粒相对位置发生改变,加大了接触面附近土颗粒间的孔隙,从而表现为剪胀;法向应力较高时,由受剪过程中土粒相互错动产生的向上抵力不足以突破法向应力的束缚,故表现为剪缩.而对于土样初始干密度较小的情况,土体较为松散,剪切过程中剪切面附近土颗粒位置移动填充了颗粒间及土体与混凝土面间的空隙,故表现为剪缩.

3 结论

本文开展了黄土与混凝土接触面大型直剪试验,分析了土样初始干密度、法向应力等因素对接触面剪切性状的影响. 所得主要结论如下:

(1)随着法向应力的增加,不同土样初始干密度下接触面剪应力-剪切位移曲线由弱软化型逐渐过渡为弱硬化型,最后转变为强硬化型.

(2)随着土样初始干密度的增加,接触面剪应力-剪切位移曲线的初始斜率增大,抗剪强度增大,粘聚力先增大再减小,内摩擦角持续增大. 且随着法向应力的增加,土样初始干密度对接触面抗剪强度的影响增大.

(3)随着土样初始干密度的减小或法向应力的增加,体应变增大,黄土与混凝土接触面由剪胀逐渐转化为剪缩.

参考文献 References

- [1] 肖杰, 屈文俊, 朱鹏, 等. 砂土与硫酸腐蚀混凝土接触面剪切试验研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(9): 2613-2620.
XIAO Jie, QU Wenjun, ZHU Peng, et al. Experimental study of interface shear behaviors between sand and concrete corroded by sulfuric acid[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(9): 2613-2620.
- [2] 王伟, 卢廷浩, 宰金珉, 等. 土与混凝土接触面反向剪切单剪试验[J]. 岩土力学, 2009, 30(5): 1303-1306.
WANG Wei, LU Tinghao, ZAI Jinmin, et al. Negative shear test on soil-concrete interface using simple shear apparatus[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(5): 1303-1306.
- [3] 冯大阔, 张建民. 剪切路径对土与结构接触面三维循环特性影响研究[J]. 土木工程学报, 2018, 51(9): 84-91, 101.
FENG Dakuo, ZHANG Jianmin. Influence of shear paths on 3D cyclic behaviors of the gravel-structure interface[J]. China Civil Engineering Journal, 2018, 51(9): 84-91, 101.
- [4] 陈琛, 冷伍明, 杨奇, 等. 混凝土桩-泥皮-砂土接触面力学特性试验研究[J]. 岩土力学, 2018, 39(7): 2461-2472.
CHEN Chen, LENG Wuming, YANG Qi, et al. Experimental study of mechanical properties of concrete pile-slurry-sand interface[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(7): 2461-2472.
- [5] 成浩, 王珣, 张家生, 等. 颗粒粒度与级配对碎石料与结构接触面剪切特性的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2018, 49(4): 925-932.
CHENG Hao, WANG Xuan, ZHANG Jiasheng, et al. Effects of particle size and gradation on shear behavior of interface between crushed stone and structure[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2018, 49(4): 925-932.
- [6] SU L J, ZHOU W H, CHEN W B, et al. Effects of relative roughness and mean particle size on the shear strength of sand-steel interface[J]. Measurement, 2018, 122: 339-346.
- [7] HOSSAIN M A, YIN J H. Behavior of a Pressure-Grouted Soil-Cement Interface in Direct Shear Tests[J]. International Journal of Geomechanics, 2014, 14(1): 101-109.
- [8] 王伟, 卢廷浩, 周爱兆. 土与混凝土接触面反向单剪本构模型[J]. 土木建筑与环境工程, 2011, 33(1): 59-64.
WANG Wei, LU Tinghao, ZHOU Aizhao. Constitutive Model for Negative Simple-sheared Soil-concrete Interface[J]. Journal of Civil Architectural and Environmental Engineering, 2011, 33(1): 59-64.
- [9] 杨庆光, 梁凌川, 杨治飞, 等. 填土中锚固体-土接触面剪切特性研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(S2): 235-239.
YANG Qingguang, LIANG Lingchuan, YANG Yifei, et al. Shear characteristics of anchoring solid-soil interface in filled soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(S2): 235-239.
- [10] 赵春风, 吴悦, 赵程, 等. 考虑卸荷效应的砂土-混凝土接触面剪切特性影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(4): 1020-1029.
ZHAO Chunfeng, WU Yue, ZHAO Cheng, et al. Effect of unloading on shear behavior of interface between sand and concrete[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(4): 1020-1029.
- [11] 赵春风, 龚辉, 赵程, 等. 考虑法向应力历史的黏土-混凝土界面弹塑性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(4): 848-855.
ZHAO Chunfeng, GONG Hui, ZHAO Cheng, et al. Elastoplastic analysis of interface between clay and concrete considering effect of normal stress history[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(4): 848-855.
- [12] 曹卫平, 陆清元, 梁鹏. 常/变法向应力作用下密砂-混凝土接触面剪切力学性状试验研究[J]. 建筑结构, 2015, 45(1): 82-86.
CAO Weiping, LU Qingyuan, LIANG Peng. Experimental study on shear mechanical properties on dense sand-concrete interface under constant and varying nor-

- mal stress [J]. Building Structure, 2015, 45 (1): 82-86.
- [13] 梁鹏, 曹卫平, 陆清元. 常/变法向应力下松砂-混凝土接触面剪切力学性状试验研究[J]. 建筑结构, 2014, 44(8): 61-65.
- LIANG Peng, CAO Weiping, LU Qingyuan. Experimental research on shear properties of loose sand-concrete interface under constant /varying normal stress [J]. Building Structure, 2014, 44(8): 61-65.
- [14] 陆勇, 周国庆. 粗粒土与结构接触面作用机理及本构规律分类[J]. 工业建筑, 2012, 42(S1): 468-471.
- LU Yong, ZHOU Guoqing. Interaction mechanism and constitutive law's classification of coarse granular soil-structure interface[J]. Industrial Construction, 2012, 42(S1): 468-471.
- [15] 干飞, 叶晓明, 阴可, 等. 基于局部应力变形测试方法的土-结构物渐进破坏试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(3): 734-742.
- GAN Fei, YE Xiaoming, YIN Ke, et al. Experimental study on progressive failure of soil-structure interfaces based on a new measuring method of local stress and displacement[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(3): 734-742.
- [16] 孔洋, 阮怀宁, 黄雪峰. 黄土丘陵沟壑区压实回填土地基沉降计算方法[J]. 岩土工程学报, 2018, 40 (S1): 218-223.
- KONG Yang, RUAN Huaining, HUANG Xuefeng. Method for calculating foundation settlement of compacted backfill in hilly and gully regions of loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(S1): 218-223.
- [17] 杜伟飞, 郑建国, 刘争宏, 等. 黄土高填方地基沉降规律及排气条件影响[J]. 岩土力学, 2019, 40(1): 325-331.
- DU Weifei, ZHENG Jianguo, LIU Zhenghong, et al. Settlement behavior of high loess-filled foundation and impact from exhaust conditions[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(1): 325-331.
- [18] 黄雪峰, 孔洋, 李旭东, 等. 压实黄土变形特性研究与应用[J]. 岩土力学, 2014, 35(S2): 37-44.
- HUANG Xuefeng, KONG Yang, LI Xudong, et al. Study and application of deformation characteristics of compacted loess[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(S2): 37-44.
- [19] 乔来军, 周国庆, 商翔宇, 等. 不同含水量黄土-砂浆接触特性试验应用研究[J]. 地下空间与工程学报, 2010, 6(S2): 1660-1664.
- QIAO Laijun, ZHOU Guoqing, SHANG Xiangyu, et al. Study on the influence of water content on mechanical behavior of loess-sand mortar interface and its application[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2010, 6(S2): 1660-1664.
- [20] 张磊, 刘慧, 王铁行. 固结与不固结条件下黄土-混凝土接触面剪切试验[J]. 岩土力学, 2018, 39 (S2): 238-244.
- ZHANG Lei, LIU Hui, WANG Tiehang. Shear tests on loess-concrete interface under consolidation and unconsolidation conditions[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(S2): 238-244.
- [21] 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: 中国计划出版社, 1999.
- The Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Standard for soil test method: GB/T 50123-1999 [S]. Beijing: China Planning Press, 1999.
- [22] 杜时贵, 葛军荣. 岩石节理粗糙度系数 JRC 测量新方法[J]. 西安公路交通大学学报, 1999, 19(2): 10-13.
- DU Shigui, GE Junrong. The new measuring method of joint roughness coefficients [J]. Journal of Xi'an Highway University, 1999, 19(2): 10-13.

(编辑 吴海西 沈波)