

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2019.05.008

考虑渗透水压力的黏土与混凝土接触面力学特性

王柳江¹,薛晨阳¹,刘斯宏¹,袁 静²,扎西顿珠³

(1.河海大学水利水电学院,江苏 南京 210098; 2.南京市江宁区水务局,江苏 南京 211112;
3.西藏自治区水利电力规划勘测设计研究院,西藏 拉萨 850000)

摘要:采用大型直剪仪进行黏土与混凝土接触面的单向直剪试验,研究接触面在不同渗透水压力和法向应力作用下的力学特性,并对黏土与混凝土接触面的强度及应力变形特性进行分析,基于双曲线模型提出了考虑渗透水压力作用的黏土与混凝土接触面本构模型。结果表明:接触面的剪应力与相对剪切位移较好地满足双曲线关系,竖向位移表现为剪缩;接触面的抗剪强度与接触土体的饱和状态显著相关,当土体由非饱和状态过渡至饱和状态时,接触面抗剪强度随渗透水压力的增大显著降低;当接触土体趋于饱和时,抗剪强度随渗透水压力增大的降幅随之减小,且与有效法向应力间呈较好的线性关系;模型计算结果与试验结果吻合较好,验证了所提出的考虑渗透水压力作用下黏土与混凝土的接触面本构模型是合理的。

关键词:黏土;混凝土;接触面;力学特性;本构模型;双曲线模型;界面渗透水压力;大型直剪试验
中图分类号: TU443;TV431 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2019)05-0447-07

Experimental study on mechanical properties of interface between clay and concrete considering the action of interfacial water pressure

WANG Liujiang¹, XUE Chenyang¹, LIU Sihong¹, YUAN Jing², TASHI Dunzhu³

(1. College of Water Conservancy and Hydropower, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Bureau of Water Affairs of Jiangning District, Nanjing 211112, China;
3. Tibet Hydraulic Waterpower Planning and Designing Institution, Lasa 850000, China)

Abstract: The mechanical behaviors of interface between clay and concrete were investigated by unidirectional direct shear tests under different interfacial water pressure and normal stress conditions, from which the shear strength and stress-strain relations of interface were analyzed. After that, a constitutive model for the interface between clay and concrete was proposed based on the hyperbolic model considering the influence of interfacial water pressure. According to the test, it can be found that there is a hyperbolic relationship between shear stress and shear displacement, and the vertical displacement mainly expresses the shear shrinkage. The shear strength of interface is significantly correlated with the saturation state of soil near the interface. The shear strength of interface decreases obviously with the increase of interfacial water pressure when the surrounding soil changes from unsaturated state into saturated state. However, when the surrounding soil is saturated, the reduction of shear strength with the increase of interfacial water pressure becomes smaller, and the relationship between the shear strength and the effective normal stress is linear. The predicted result by the model corresponds with the experimental data, which illustrates that the proposed model is reasonable and practical.

Key words: clay; concrete; interface; mechanical characteristic; constitutive model; hyperbolic model; interfacial water pressure; large-scale direct shear test

基金项目: 国家自然科学基金(U1765205,51509077);中央高校基本科研业务费专项(2016B03514)
作者简介: 王柳江(1985—),男,副教授,博士,主要从事土石坝工程材料特性及数值模拟研究。E-mail:15850514642@163.com
引用本文: 王柳江,薛晨阳,刘斯宏,等.考虑渗透水压力的黏土与混凝土接触面力学特性[J].河海大学学报(自然科学版),2019,47(5):447-453.
WANG Liujiang, XUE Chenyang, LIU Sihong, et al. Experimental study on mechanical properties of interface between clay and concrete considering the action of interfacial water pressure[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2019, 47(5): 447-453.

黏土与结构物的接触面广泛存在于各类岩土工程中,且由其产生的问题日益突出^[1]。在土石坝工程中,最为突出的包括高土石坝及混合坝工程中防渗黏土与坝基或岸坡接触部位、黏土心墙与混凝土接头部位。由于受场地条件及碾压施工技术限制,这些部位难以压实,且实际工程中料源复杂,还会产生孔洞、裂隙等缺陷。当坝体蓄水运行后,库水一旦渗入,将会导致黏土与混凝土接触面力学性状的改变,使接触部位产生较大的剪切变形或切向裂缝,对坝体渗流安全产生不利影响,严重情况下还可能诱发接触冲刷、管涌问题,进而造成土石坝失事^[2]。因此,研究黏土与混凝土接触面在渗透水压力作用下的力学特性,对于高土石心墙坝或混合坝的防渗安全具有重要的现实意义。

目前,不少学者对土与结构物接触面力学特性及其本构关系开展了较为系统的研究^[3-4]。Clough等^[5]开展直剪试验研究了土和混凝土接触面的力学特性,并采用双曲线模型描述剪应力与相对剪切位移的关系。Desai等^[6]研制了多自由度循环剪切仪,研究了土与结构材料接触面的静、动力特性,并提出了循环荷载作用下的接触面非线性本构模型。Brandt^[7]研制了大型盒式直剪仪研究了土与混凝土的接触面力学特性,认为接触面附近土体的渐进破坏会影响其应力-应变关系曲线。殷宗泽等^[8]在混凝土试样中埋设了微型“潜望镜”装置,观测了直剪试验过程中土与混凝土相对剪切位移沿接触面的分布,提出了接触面刚塑性变形的观点及相应的本构关系。胡黎明等^[9-10]改进了直剪仪,研究了相对粗糙度对砂土和结构接触面物理力学行为的影响,并通过数字照相技术记录了接触面附近土颗粒的位移情况,分析了其破坏机理,在此基础上建立了反映剪切过程中应变软化和剪胀现象的粗糙接触面损伤力学本构模型。张嘎等^[11]研制了大型土与结构接触面循环加载剪切仪,对单调和循环荷载作用下包括粗粒土在内的多种土与结构接触面的受力变形机理、物理力学规律及模拟分析方法进行了较为系统的研究。上述研究更多注重于接触面剪切机理方面。

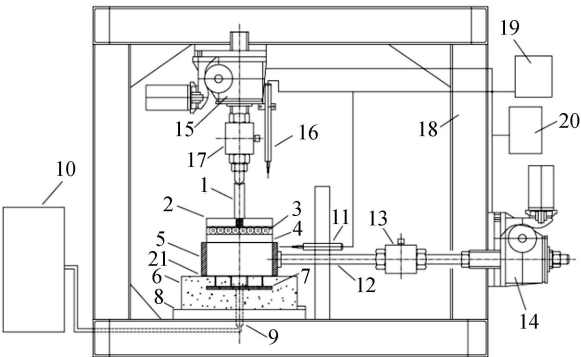
近年来,黏土与混凝土的接触力学特性及其影响因素的研究开始得到了国内一些学者的关注,其中,主要集中在土体含水率、结构面粗糙度、法向压力及土样厚度等影响因素^[12-19]。徐泽友等^[12]研究了高塑性黏土与混凝土间接接触面的剪切特性;王伟等^[13-15]研究了结构物自身亲水性及土体含水率等对黏土与结构物接触面力学行为及破坏模式的影响,提出了一个能同时反映硬化和软化性质的接触面复合指数模型;张治军等^[16-17]分析了泥皮厚度以及含水量变化对粗粒土与混凝土接触面的影响;刘方成等^[18]、石熊等^[19]研究了结构面粗糙度对黏土和混凝土接触面力学特性的影响。上述研究中均未考虑渗透水压力对黏土和混凝土接触面力学特性的影响。雷红军等^[2]开发了一种接触面剪切渗流试验装置,对黏土-结构接触面大剪切变形后的渗流特性进行了试验研究,重点模拟了接触面存在填筑缺陷及含有杂质2种工况下的渗流特性,但该研究侧重于剪切变形对接触面渗流特性的影响,未考虑渗流对接触面剪切变形的耦合作用。

为深入了解接触面存在界面渗透水压情况下的物理力学特性变化规律,本文将研制可以在界面处施加渗透水压力的混凝土结构物,利用大型直剪仪对接触黏土与混凝土结构物的接触面进行单向直剪试验,重点模拟黏土与混凝土接触面在不同渗透水压力和法向应力作用下的应力变形规律及强度特性;在此基础上,参考现有的接触面本构模型,提出一个能够考虑渗透水压力影响的接触面本构模型,以期用于相关工程计算。

1 接触面试验

1.1 试验装置

图1为试验采用的SH-DJ-02接触面大型直剪仪^[20]。由竖向加载系统、水平向剪切系统、剪切框、混凝土结构物、计算机控制数据采集系统组成。竖向加载系统由伺服电机、法向力作动器和控制器组成,法向力作动器安装在具有足够强度与刚性的自反力架上。作动器产生的法向力通过压杆施加于土样上,法向力由连接在压杆上的力传感器测量。



1—刚性传力杆;2—加载板;3—滚轮;4—顶盖;5—剪切框;6—混凝土结构物;7—透水石;8—刚性底板;9—橡胶管;10—渗透水压力控制系统;11—水平向位移计;12—水平拉杆;13—水平向拉压力传感器;14—水平向电机;15—竖向电机;16—竖向位移计;17—竖向压力传感器;18—自反力架;19—数据采集系统;20—电机伺服控制器;21—可拆卸式滚轮

图1 大型黏土-混凝土接触面直剪仪

Fig.1 Large-scale direct shear apparatus for clay and concrete interface

水平剪切力通过与剪切盒连接的水平拉杆施加,水平拉杆由另一安装在自反力架侧边的伺服电机驱动。为防止竖向传力杆对水平向剪切的约束,在试样顶盖与竖向加压板之间设置了一排滚轮。混凝土试块表面设置了 2 排放置滚轮的轨道槽,用以减小摩擦。在水平拉杆上连接有一个力传感器,用以量测水平剪切力。在剪切框前方和土样顶部加压板上分别安装了 2 个位移计,用以测量接触面的相对剪切位移和试验过程中接触面法向位移。

通过计算机控制数据采集装置完成力传感器、位移计的测量、法向力的控制、剪切速率的控制等,采集数据并记录,实时绘制剪切力与剪切应变曲线、变形与时间曲线等,并将记录的数据以 Excel 的文件格式输出。

试验所采用的混凝土结构物尺寸为 350 mm×350 mm×100 mm(长×宽×高),如图 2 所示。为控制接触面上的渗透水压力,混凝土结构采用如下方法浇制,在其底部设置连接水压控制装置的接头,高压水可通过与接头连接的硬质橡胶管注入混凝土内部,混凝土内部设有由透水石填充的内腔,内腔与混凝土表面之间布置了 16 个针孔状的透水孔,可将渗透水压力均匀地施加在接触面上,透水孔按 4×4 矩阵排列分布,渗透水压力通过 TCK-1 型三轴仪反压系统施加。

1.2 试验材料

土料采用某混合坝工程心墙与混凝土接头处的接触黏土,该黏土相对密度为 2.75,液限为 35%,塑限为 16.5%,试验时土样先过 2 mm 筛,相应的级配曲线如图 3 所示,其限制粒径 $d_{60}=0.65\text{ mm}$,有效粒径 $d_{10}=0.074\text{ mm}$,不均匀系数 $C_u=9$,曲率系数 $C_c=1.52$ 。根据击实试验结果,土样最优含水率为 15.3%,最大干密度为 1.62 g/cm^3 。

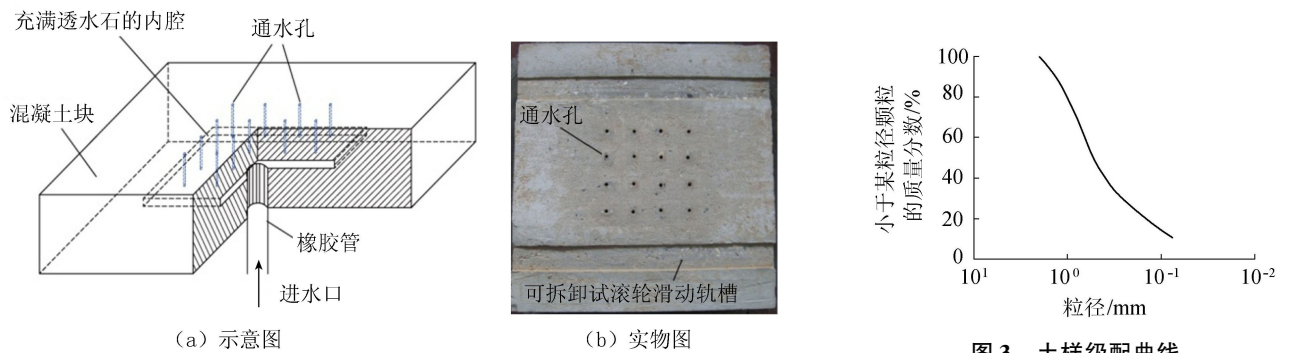


图 2 混凝土结构物
Fig.2 Concrete structure

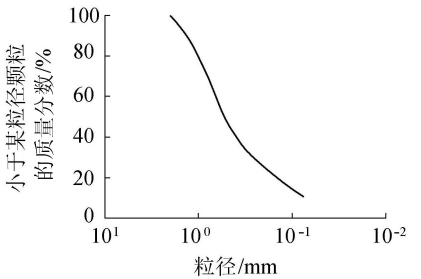


图 3 土样级配曲线
Fig.3 Particle size distribution curve of the clay

1.3 试验方法

试样尺寸为 200 mm×200 mm×100 mm,含水率按照 16% 配制,干密度控制在 1.56 g/cm^3 左右。试验开始时,首先施加竖向荷载,待土体法向变形稳定后开始剪切,试验过程中采集剪应力、水平向和法向位移数据,试验结束后对接触面处的土体进行含水率测定。为研究不同渗透水压力和法向应力对土与混凝土接触面力学特性的影响,按渗透水压力的大小(0 kPa、50 kPa、100 kPa、150 kPa、200 kPa)共开展了 5 组试验,且每组试验包括 4 个试样,分别施加 250 kPa、375 kPa、500 kPa、750 kPa 的法向应力。试验剪切速率为 0.5 mm/min ,当剪应力趋于稳定或相对剪切位移大于 15 mm 时,停止试验。为保证试验结果的重复性,对每组试验开展平行试验以进行检验。

值得注意的是,由于试验过程接触面上的高压水容易沿土与混凝土接触面从剪切框四周渗出,难以保证接触面处的渗透水压力稳定。为此,试验过程中采用了在试样四周及底面小部分区域采用塑料布包裹的方法,如图 4 所示。

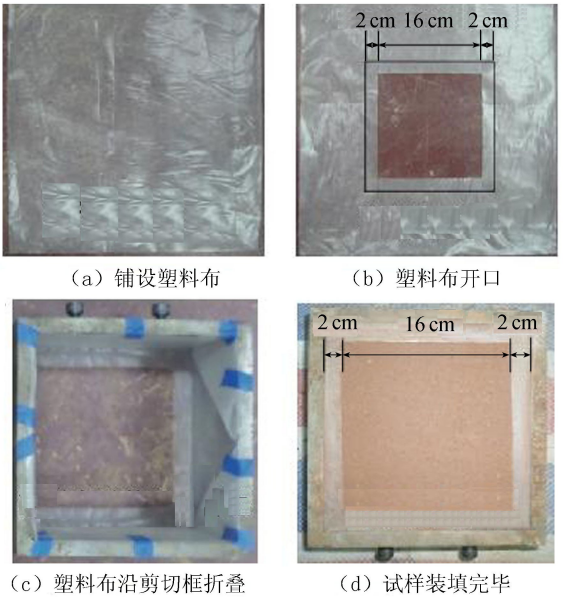


图 4 塑料布包裹装样过程
Fig.4 Sample filling process using plastic cloth

2 试验结果分析

试验前后接触面部位的状态如图5所示。可以看到,试验后接触面的土体由干燥的非饱和状态转变为潮湿的近饱和状态,出现了软化现象;同时,在试样剪切方向,接触面处的土体出现了明显的剪切变形,塑料布也发生了一定的变形。

2.1 接触面应力位移曲线

图6给出了接触面渗透水压力为50 kPa,对应不同法向应力的接触面剪切应力和法向位移与相对剪切位移间的关系曲线。由图6可见:随着相对剪切位移增大,黏土与混凝土接触面的剪切应力逐渐增大并趋于稳定,剪切应力与相对剪切位移之间的关系表现为硬化型曲线,未出现明显的应变软化现象;接触面法向位移随相对剪切位移的增加而单调增大,这说明接触面附近土体的法向变形主要表现为剪缩,且剪缩量随法向应力的增大而增大;剪切应力和法向位移随相对剪切位移的变化趋势基本一致,两者基本同时趋于稳定。

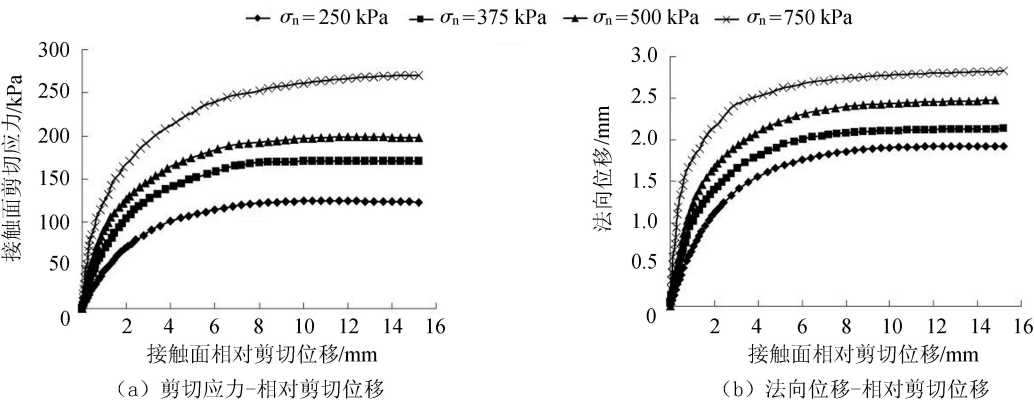


图6 不同竖向应力条件下接触面剪切试验曲线($p_w=50$ kPa)

Fig.6 Shear stress-shear displacement and vertical displacement-shear displacement curves under different normal stresses ($p_w=50$ kPa)

图7给出了对应法向应力500 kPa时,不同渗透水压力作用下的黏土与混凝土接触面剪切应力与相对剪切位移关系曲线。由图7可知:在法向应力相同时,渗透水压力对黏土与混凝土接触面应力位移特性的影响较大,接触面抗剪强度随渗透水压力的增大而减小,其中当接触面渗透水压力由0 kPa增大到50 kPa时,其抗强度减小幅度明显大于渗透水压力由50 kPa增大到200 kPa的情况。这是由于当渗透水压力由0 kPa增大到50 kPa时,接触土体由非饱和状态变为饱和状态,从而引起土体软化、强度降低,进而使接触面抗剪强度显著减小;当渗透水压由50 kPa增大到200 kPa时,由图8可见,试验结束后的接触土体含水率均在25%左右,可以认为此时接触面抗剪强度主要受渗透水压力的影响。

2.2 考虑渗透水压力的黏土与混凝土接触面抗剪强度

图9给出了黏土与混凝土接触面的抗剪强度与有效法向应力的关系及拟合结果,其中有效法向应力为法向应力与渗透水压力之差($\sigma_n - p_w$)。由图9可见:黏土与混凝土结构接触面的抗剪强度

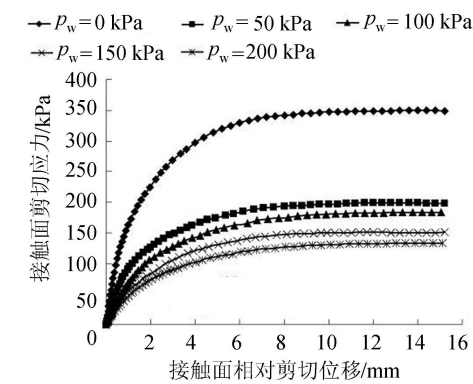


图7 不同渗透水压力作用下接触面剪切应力-相对剪切位移关系曲线($\sigma_n=500$ kPa)

Fig.7 Shear stress-shear displacement curves under different interfacial water pressures ($\sigma_n=500$ kPa)

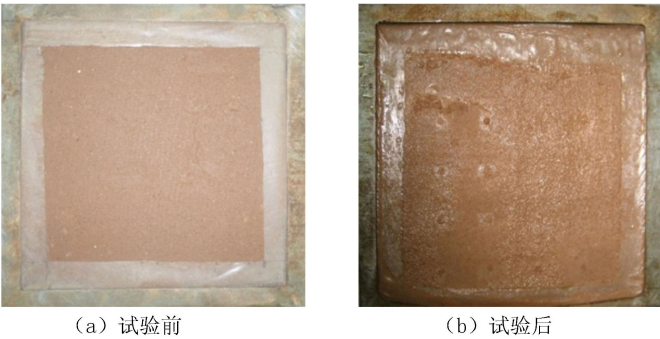


图5 试验前后黏土与混凝土接触部位状态照片

Fig.5 State of soil at the interface before and after the direct shear test

与有效法向应力之间存在较好的线性关系,当接触面不存在渗透水压力时,其抗剪强度明显大于存在渗透水压力的情况;当接触面存在渗透水压力作用时,不同渗透水压力下的抗剪强度与有效法向应力关系点基本在同一条直线上,说明渗透水压力和法向应力对接触面抗剪强度的影响可采用有效法向应力统一表征。根据图 9 中的线性拟合关系,采用莫尔-库仑准则中的黏聚力 c 和内摩擦角 φ 定义黏土与混凝土接触面的抗剪强度,可得当接触面不存在渗透水压力时, $\varphi=28.4^{\circ}$, $c=79.9\text{ kPa}$;当接触面存在渗透水压力时, $\varphi=12.7^{\circ}$, $c=63.9\text{ kPa}$ 。

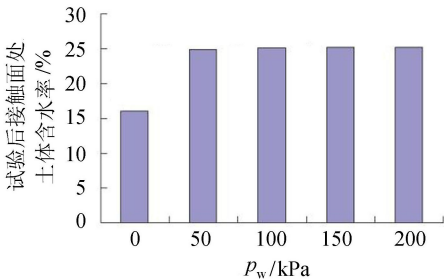


图 8 剪切试验结束后接触土体含水率
Fig.8 Water contents for soils near the interface after direct shear tests

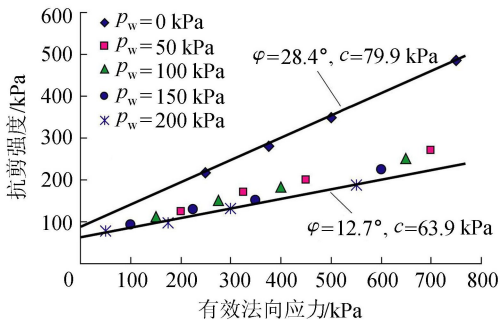


图 9 不同渗透水压力作用下接触面抗剪强度拟合曲线
Fig.9 Shear strength of interface under different interfacial water pressures

2.3 考虑渗透水压力的接触面应力位移双曲线模型

根据黏土与混凝土接触面直剪试验得到的剪切应力与相对剪切位移关系曲线,采用双曲线模型能够对其进行较好地描述:

$$\tau = \frac{w_s}{\frac{1}{k_{si}} + \frac{w_s}{\tau_u}} \tag{1}$$

其中 $k_{si} = K_1 \rho_w g \left(\frac{\sigma'_n}{\rho_w g} \right)^n$ $\tau_u = \frac{\sigma'_n \tan \varphi + c}{R_f}$

式中: w_s ——相对剪切位移; k_{si} ——初始剪切劲度; τ_u —— $w_s \rightarrow \infty$ 时对应的剪应力; ρ_w ——水的密度; K_1 ——刚度模数; n ——拟合参数; R_f ——破坏比。

在不同渗透水压力作用下, $\ln K_1$ 、 n 与渗透水压力 p_w 之间呈较好的线性关系,如图 10 所示,则 K_1 、 n 与渗透水压间可采用如下关系式拟合:

$$K_1 = \exp(\alpha p_w + \beta) n = b p_w + m \tag{2}$$

式中: α 、 β 、 b 、 m ——拟合参数。

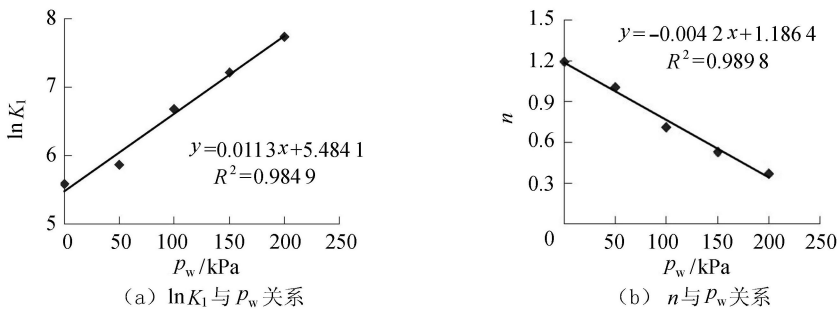


图 10 K_1 、 n 与 p_w 的拟合关系
Fig.10 Fitting relationships between K_1 , n and interfacial water pressure p_w

由式(1)(2)可得

$$\tau = \frac{w_s}{\frac{1}{\exp(\alpha p_w + \beta) \rho_w g \left(\frac{\sigma'_n}{\rho_w g} \right)^{b p_w + c}} + \frac{R_f w_s}{\sigma'_n \tan \varphi + c}} \tag{3}$$

利用直剪试验结果,求得本文推导的能够初步考虑渗透水压力作用的黏土与混凝土接触面本构模型参数如下: $\alpha=0.0113$, $\beta=5.4841$, $b=-0.0042$, $m=1.1864$ 。当接触面存在渗透水压力大于0时, $\varphi=12.7^\circ$, $c=63.9\text{ kPa}$ 。与邓肯 E-B 模型类似,不同竖向应力下的破坏比 R_f 略有不同,本文取其平均值, $R_f=0.85$ 。将上述参数代入式(3),分别计算法向应力为 250 kPa、375 kPa、500 kPa、750 kPa 时,接触面不同渗透水压力作用下的接触面应力变形关系曲线,计算结果与试验结果对比见图 11,图中标记点表示试验结果,实线表示模型预测结果。从图 11 中可以看到预测值与试验值吻合较好,说明本文提出的考虑渗透水压力作用的接触面本构模型能够较好地预测渗透水压力对黏土与混凝土接触面应力变形特性的影响。值得注意的是,随着法向应力的变化,模型预测值与实测值之间的差异也产生了一定的变化,这主要与破坏比 R_f 的取值有关, R_f 在实际情况下随法向应力有所变化,但在模型预测中取平均值;此外,还可以发现该模型能够较好模拟初始剪切阶段的应力位移关系,但对于剪切后期的预测效果较差,这可能与该模型基于双曲线模型提出有关,当采用双曲线模型时,剪应力随位移发展趋于稳定的速度较慢。

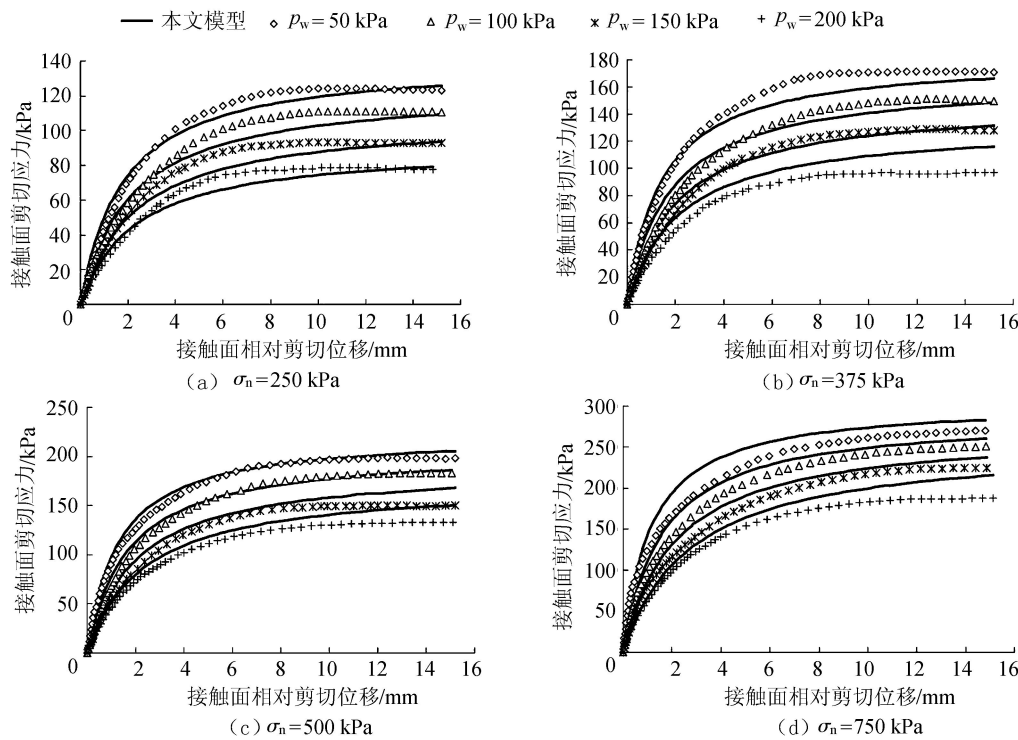


图 11 模型计算曲线与试验曲线的比较

Fig. 11 Comparison between calculation and test curves

3 结 论

- a. 黏土与混凝土接触面抗剪强度随渗透水压力的增大而减小,当接触土体由非饱和状态过渡到近饱和状态时,接触面抗剪强度降低幅度明显大于接触面部位土体处于近饱和状态时由渗透水压力增大而降低的幅度。
- b. 当接触土体趋于饱和时,考虑渗透水压力作用的接触面抗剪强度与有效法向应力呈线性关系,符合摩尔-库伦强度准则,表明利用有效法向应力可统一描述渗透水压力对黏土与混凝土接触面抗剪强度特性的影响。
- c. 本文提出的模型参数确定方法简单、物理意义相对明确,且模型预测结果和试验结果吻合较好,表明该模型能够较好地模拟界面渗透水压力对接触面力学特性的影响。

参考文献:

[1] 周爱兆, 卢廷浩, 刘尧. 土与结构接触面力学特性研究现状与展望[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2007, 35(5): 524-528. (ZHOU Aizhao, LU Tinghao, LIU Yao. Current research and prospect of mechanical behaviors of soil-structure interfaces[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2007, 35(5):524-528. (in Chinese))

[2] 雷红军,刘中阁,于玉贞,等. 黏土-结构接触面大剪切变形后渗流特性试验研究[J]. 岩土力学,2011,32(4):1041-1044. (LEI Hongjun, LIU Zhongge, YU Yuzhen, et al. Experimental study of seepage characteristics of clayey soil-structure interface under large shear deformation[J]. Rock and Soil Mechanics,2011,32(4):1041-1044. (in Chinese))

[3] 何亮,李国英,李雄威. 带肋钢筋与堆石料接触面剪切特性[J]. 河海大学学报(自然科学版),2019,47(2):138-143. (HE Liang, LI Guoying, LI Xiongwei. Shear characteristics of the contact surface between ribbed bars and rockfill materials[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2019,47(2):138-143. (in Chinese))

[4] 石泉彬,杨平,孙厚超. 冻土直剪仪多功能改进与试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2017,45(5):457-463. (SHI Quanbin, YANG Ping, SUN Houchao. Multi-function improvement and experimental study on the direct shear apparatus for frozen soil[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2017,45(5):457-463. (in Chinese))

[5] CLOUGH G W, DUNCAN J M. Finite element analysis of retaining wall behavior[J]. Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering Division, ASCE, 1971, 97(12):1657-1673.

[6] DESAI C S, RIGBY D B. Cyclic interface and joint shear device including pore pressure effects[J]. Journal of Geotechnical and Geo-environmental Engineering, ASCE, 1997, 123(6):568-579.

[7] BRANDT J R T. Behavior of soil-concrete interface [D]. Edmonton: The University of Alberta, 1985.

[8] 殷宗泽,朱泓,许国华. 土与结构材料接触面的变形及其数学模拟[J]. 岩土工程学报,1994,6(3):14-22. (YIN Zongze, ZHU Hong, XU Guohua. Numerical simulation of the deformation in the interface between soil and structure material[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,1994,6(3):14-22. (in Chinese))

[9] 胡黎明,濮家骝. 土与结构物接触面物理力学特性试验研究[J]. 岩土工程学报,2001,23(4):431-435. (HU Liming, PU Jialiu. Experimental study on mechanical characteristics of soil-structure interface[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2001,23(4):431-435. (in Chinese))

[10] 胡黎明,濮家骝. 土与结构物接触面损伤本构模型[J]. 岩土力学,2002,23(1):6-11. (HU Liming, PU Jialiu. Damage model of soil-structure interface[J]. Rock and Soil Mechanics,2002,23(1):6-11. (in Chinese))

[11] 张嘎,张建民. 大型土与结构接触面循环加载剪切仪的研制及应用[J]. 岩土工程学报,2003,25(2):149-153. (ZHANG Ga, ZHANG Jianmin. Development and application of cyclic shear apparatus for soil-structure interface[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2003,25(2):149-153. (in Chinese))

[12] 徐泽友,卢廷浩,丁明武. 高塑性黏土与混凝土接触面剪切特性[J]. 河海大学学报(自然科学版),2009,37(1):71-74. (XU Zeyou, LU Tinghao, DING Mingwu. Shear properties at interface between highly plastic clay and concrete[J]. Journal of Hohai University (Nature Sciences), 2009, 37(1):71-74. (in Chinese))

[13] 王伟,卢廷浩,宰金珉. 含水率对不同接触面抗剪强度影响直剪试验分析[J]. 岩土力学,2006,27(增刊1):501-504. (WANG Wei, LU Tinghao, ZAI Jinmin. Improved direct shear test on soil water content effect on shear strength of contact faces between soil and different structures[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(Sup1):501-504. (in Chinese))

[14] 王伟. 基于能量耗散原理的土与结构接触面模型研究和应用[D]. 南京:河海大学,2006.

[15] 王伟,张芳,孙斌祥. 土-结构接触面剪切试验与应力-位移模型[J]. 煤炭学报,2011,36(9):1469-1473. (WANG Wei, ZHANG Fang, SUN Binxiang. Tested and modeled shear stress-displacement behavior of soil-structure interface[J]. Journal of China Coal Society,2011,36(9):1469-1473. (in Chinese))

[16] 张治军,饶锡保,王志军,等. 泥皮厚度对结构接触面力学特性影响的试验研究[J]. 岩土力学,2008,29(9):2433-2438. (ZHANG Zhijun, RAO Xibao, WANG Zhijun, et al. Experimental study on influence of slurry thickness on mechanical behavior of interface between gravel and concrete[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(9):2433-2438. (in Chinese))

[17] 张治军,饶锡保,丁红顺,等. 不同含水率泥皮对接触面力学特性影响的试验研究[J]. 长江科学院院报,2007,24(5):60-67. (ZHANG Zhijun, RAO Xibao, DING Hongshun, et al. Influence of slurry with different water capacities on behavior of gravel-structure interface[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2007, 24(5):60-67. (in Chinese))

[18] 刘方成,尚守平,王海东. 粉质黏土-混凝土接触面特性单剪试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2011,30(8):1720-1728. (LIU Fangcheng, SHANG Shouping, WANG Haidong. Study of shear properties of silty clay-concrete interface by simple shear tests[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2011,30(8):1720-1728. (in Chinese))

[19] 石熊,张家生,刘蓓,等. 红黏土与混凝土接触面剪切特性试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版),2015,46(5):1826-1831. (SHI Xiong, ZHANG Jiasheng, LIU Bei, et al. Experimental research on shearing properties of interface between red clay and concrete[J]. Journal of Central South University (Science and Technology),2015,46(5):1826-1831. (in Chinese))

[20] 刘斯宏,黄明坤,王子健,等. 破碎性堆石料单剪试验研究[J]. 岩土工程学报,2015,37(8):1503-1508. (LIU Sihong, HUANG Mingkun, WANG Zijian, et al. Simple shear test on breakable rockfill materials[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2015,37(8):1503-1508. (in Chinese))