

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2017.03.016



红层泥岩桩-岩接触面本构模型试验及数值模拟

胡启军¹, 蒋晶¹, 徐亚辉², 石仁丹¹, 张宇浩¹

(1. 西南石油大学 土木工程与建筑学院, 成都 610500; 2. 四川省蜀通岩土工程公司, 成都 610018)

摘要: 桩-岩(土)接触面力学特性的研究是桩基承载机理研究的基础。通过红层泥岩桩-岩接触面大型直剪试验, 研究了红层泥岩桩-岩接触面的力学特性, 结果表明: 接触面剪应力先随剪切位移增大而增大, 在达到峰值后, 剪应力随着剪切位移增大而降低, 并最终趋于稳定值, 应力-应变曲线呈现出应变软化的特征。根据剪切试验结果, 推导出桩-岩接触面应变软化本构方程。利用 fish 语言对 FLAC^{3D} 中自带的理想弹塑性接触单元进行二次开发, 并应用开发的模型对桩岩接触面直剪试验进行了数值模拟, 分析剪应力与剪切位移之间的关系, 证明了该本构能够较好地模拟接触面间的应变软化特性。

关键词: 红层泥岩; 桩-岩接触面; 应变软化; 本构模型; 数值模拟

中图分类号: TU473.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2017)03-0122-07

Interface constitutive model test and numerical simulation of red mudstone pile-rock

Hu Qijun¹, Jiang Jing¹, Xu Yahui², Shi Rendan¹, Zhang Yuhao¹

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, P. R. China;
2. Sichuan Shutong Geotechnical Engineering Company, Chengdu 610018, P. R. China)

Abstract: The pile-rock (soil) interface mechanical behavior was the basis of pile foundation bearing mechanics. Firstly, the mechanical property of the interface was investigated through the laboratory large direct shear test of red mudstone pile-rock interface. The results indicated that the shear stress-strain curve presented strain softening behavior. The shear stress was increasing with the shear strain initially, and when the shear stress came to a peak, the shear stress was decreasing with the shear strain and finally reached a steady. Subsequently, the constitutive equation was deduced based on the interface mechanical property, the ideal elastic-plastic contact element in FLAC^{3D} was further developed through fish language. Additionally, the direct shear test of red mudstone was simulated according to the interface constitutive

收稿日期: 2016-12-07

基金项目: 国家自然科学基金(51574201); 住房和城乡建设部科技计划(2014-K3-037); 四川省科技创新苗子工程(2016119); 西南石油大学青年科技创新团队基金(2015CXTD05)

作者简介: 胡启军(1977-), 男, 副研究员, 博士(后), 主要从事岩土力学与工程研究, (E-mail) huqijunswpu@163.com.

Received: 2016-12-07

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 51574201); Ministry of Housing and Urban-Rural Development (No. 2014-K3-037); Sichuan Science and Technology Innovation Talent Project (No. 2016119); Scientific and Technical Youth Innovation Group (Southwest Petroleum University) (No. 2015CXTD05)

Author brief: Hu Qijun(1977-), associate research fellow, post doctorate, main research interests: geotechnical mechanics and engineering, (E-mail) huqijunswpu@163.com.

model, and the relationship of shear stress and shear displacement between the pile and soil were analyzed which proved that the constitutive model showed good performance on simulating strain softening features of the interface.

Keywords: red mudstone; pile-rock interface; constitutive models; strain softening; numerical simulation

目前,桩基础在岩土工程中的各个领域得到了广泛的应用,而桩-岩(土)接触面的力学性质对于桩基承载性能具有重要的影响。红层泥岩是中国西南地区广泛分布的一种软弱岩类,它的强度介于岩与土之间,在建筑物荷载作用下,表现出变形大、承载力低、复杂易变等工程特性^[1-2]。因此,研究红层泥岩与桩基础的相互作用机理具有重要的经济价值和社会意义。

桩-岩(土)接触面上两种材料的变形不一致常常会引起接触面上产生较大的剪应力,而接触面上的力学特性与岩(土)体的性质有着密切的关系^[3-4]。现阶段,主要通过桩-岩(土)接触面的剪切试验来研究桩岩相互作用的力学特性^[5-15]。文献[5]用盒式直剪仪研究了土与混凝土接触面的力学特性,建立了双曲线本构模型,因参数较少,得到了广泛的应用。文献[6-10]通过细粒土与混凝土的剪切试验,对细粒土与混凝土接触面的本构模型进行了研究。文献[11-14]根据粗粒土与混凝土的剪切试验结果,提出了粗粒土与混凝土接触面的本构模型。文献[15]通过对泥岩与混凝土进行剪切试验,修正了泥岩与混凝土的剪应力退化模型。以上对桩-岩(土)接触面研究的试验对象主要还是针对砂土、粘土以及粗粒土,对于泥岩等软岩的研究较少。本文通过红层泥岩有无泥皮桩-岩接触面大型直剪试验,研究红层泥岩桩-岩接触面力学特性。

有限差分软件FLAC^{3D}自带的Interface接触单元,可用于岩层接触、桩土接触等物体间的接触、滑移、分离等问题^[16-18]。但它是一种基于理想弹塑性Coulomb滑动本构关系的无厚度接触单元,不能反映接触面复杂的力学特性^[19]。因此,本文对FLAC^{3D}中自带接触单元进行二次开发,提高其对接触面复杂力学特性的模拟能力。

本文进行了桩-岩接触面大型直剪试验,并对接触面的力学特性进行研究,在此基础上建立本构方程,利用fish语言对FLAC^{3D}中自带的理想弹塑性接触单元进行二次开发,并运用开发的模型对桩岩接触面直剪试验进行数值模拟,分析剪应力与剪切位移之间的关系,对本构模型的准确性进行

验证。

1 室内桩-岩接触面剪切试验

1.1 试验设备及试验材料

建立合理的接触面本构模型,需要深入地揭示接触面在受荷过程中的主要力学规律和受力变形机理^[12],文献[11-15]利用桩-岩(土)接触面大型直剪试验,对桩-岩(土)之间的力学规律进行了研究。因此,本文进行红层泥岩桩-岩接触面直剪试验对接触面的力学规律进行研究。

试验设备采用西南石油大学土建院实验中心的QXZ-5000微机控制电液伺服压剪试验机,如图1所示。该试验机竖向液压加压系统最大垂直荷载5 000 kN,水平剪力加载装置最大水平荷载1 000 kN,采用电液伺服控制。计算机及分析软件可绘制力-位移曲线、位移-时间曲线、力-时间曲线等,自行设置控制参数,程序自动运行。

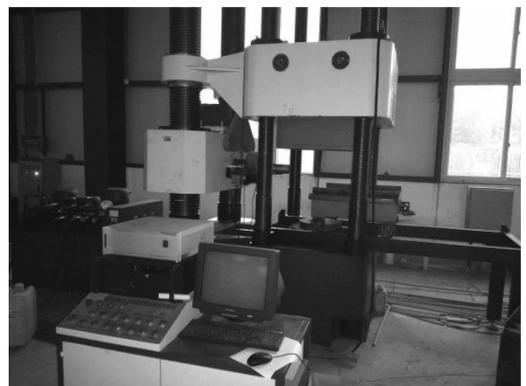


图1 试验机总体图

Fig. 1 General view of test machine

为了模拟符合现场实际的桩-岩相互作用,在试验机基础上自行设计并制作了上下剪切盒,在混凝土试块和下压板之间设置基槽,基槽由一个整块钢板镶嵌在下压板上,然后在钢板上面处理得到5条凹槽,上面放置直径12 mm的钢珠。每次试验之前,在钢板凹槽及滚珠上面涂上一层凡士林以减小剪切时的摩擦阻力。整个装置示意图如图2所示。

红层泥岩为桩侧岩层,因此,在室内桩-岩接触

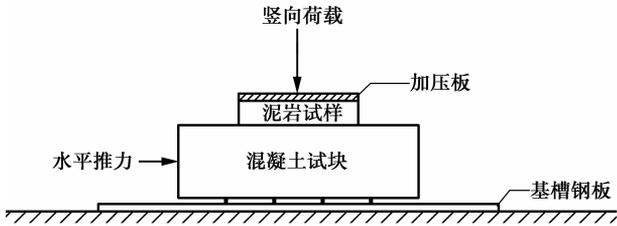


图 2 剪切试验示意图

Fig. 2 Diagram of shear test

面剪切试验中,采用现场采集红层泥岩试样与混凝土试块相互作用来进行试验的研究以确保物质材料的一致性。泥岩试块尺寸设计为 50 cm×50 cm×20 cm,试验采用室内配置 C35 混凝土,混凝土试块制作尺寸为 60 cm×60 cm×20 cm,大于红层泥岩试样尺寸,以使在剪切过程中保持剪切面积不变。

1.2 混凝土表面粗糙度设计

在实际桩基工程中,受桩侧孔壁土体强度以及旋挖钻机的影响,混凝土表面粗糙度有很大的随机性。试验根据现场桩身表面粗糙度分布的随机性,采用人工凿毛法,对混凝土试块表面进行初步粗糙度处理,保证其表面有一定的粗糙度以符合工程实际。

参考已有学者^[20-21]对混凝土表面粗糙度进行的划分,定义混凝土表面粗糙度, y 为灌砂平均深度, D 为凿毛最大深度限值,本实验设定为 10 mm。灌砂平均深度 y 可由灌砂法求得。

依据所得粗糙度 n ,将混凝土表面粗糙度划分为 3 个等级:粗糙度 I 为混凝土表面粗糙度 $n < 0.1$;粗糙度 II 为混凝土表面粗糙度 $0.1 \leq n$;粗糙度 III 为混凝土表面粗糙度 $n > 0.2$ 。

试验人工凿毛法对混凝土表面粗糙度处理结果如图 3 所示。

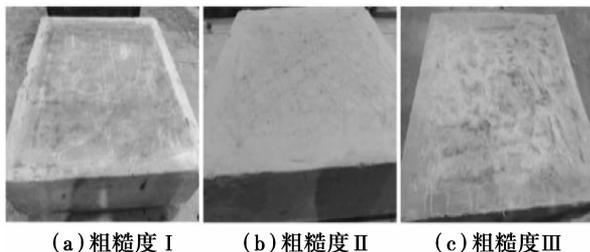


图 3 混凝土表面粗糙度

Fig. 3 Surface roughness of concrete

1.3 试验工况及模型示意图

试验工况如表 1 所示。

表 1 室内桩-岩接触面剪切试验工况
Table 1 Laboratory shear test conditions on pile-rock interface

工况	粗糙度	法向应力/kPa
工况 1-1	I	50
		150
		250
		350
工况 2-1	II	50
		150
		250
		350
工况 3-1	III	50
		150
		250
		350

1.4 试验结果与分析

1.4.1 接触面直剪试验曲线特征 接触面粗糙程度以及接触面上作用的法向应力对接触面剪切力学特性都具有重要影响。对室内桩-岩接触面剪切试验结果进行整理,作出在不同接触面粗糙程度、不同法向应力作用下桩-岩接触面剪应力-剪切位移曲线如图 4~6 所示。

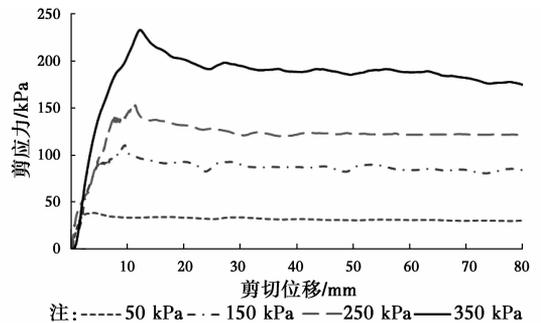


图 4 粗糙度 I 时桩-岩接触面剪应力-剪切位移曲线

Fig. 4 Shear stress-displacement curves of pile-rock interface under roughness I

从桩-岩接触面剪应力-剪切位移曲线图 4~6 可以看出,3 种粗糙度条件下,在加载初期,接触面剪应力先随剪切位移增加而增大,在达到峰值应力后,随着剪切位移增大,剪应力反而降低,并最终趋于稳定值。说明 3 种粗糙度条件下桩-岩接触面剪应力-剪切位移曲线均表现为应变软化特征。同时,随着接触面粗糙程度的增大,剪应力峰值也随之

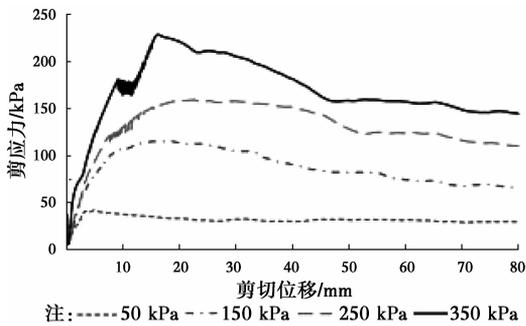


图 5 粗糙度 II 时桩-岩接触面剪应力-剪切位移曲线

Fig. 5 Shear stress-displacement curves of pile-rock interface under roughness II

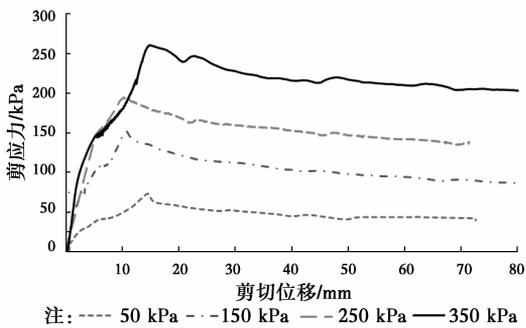


图 6 粗糙度 III 时桩-岩接触面剪应力-剪切位移曲线

Fig. 6 Shear stress-displacement curves of pile-rock interface under roughness III

增大。

当法向应力较大时,剪应力-剪切位移曲线出现明显拐点;当法向应力较小时,剪应力-剪切位移曲线达到峰值后出现下降段,最后趋于稳定,但拐点不明显。法向应力越大,接触面初始切向刚度越高,且在接触面粗糙度相同条件下,法向应力愈大,峰值应力及残余应力也越大。

1.4.2 接触面直剪试验结果分析 根据室内桩-岩接触面剪切试验曲线的特征,可以看出剪应力-剪切位移曲线呈现一定的应变软化特征,大致表现为弹性阶段、塑性阶段、应变软化阶段和残余摩擦阶段 4 个阶段。

在加载初期,桩-岩接触面的剪应力随剪切位移的增大近似呈线性增加,抗剪强度主要由红层泥岩与混凝土结构粗糙接触面上的咬合力承担,此阶段为弹性阶段。

随着水平荷载的持续增加,超过极限弹性剪应力之后进入塑性阶段。在此阶段,接触面抗剪强度主要由两方面构成:一方面是由于红层泥岩部分土

体嵌入到混凝土粗糙表面的凸凹缝中,而发生的混凝土在剪切方向对土体产生的阻力;另一方面为剪切面上破碎的土颗粒之间的滑动摩擦和红层泥岩与混凝土结构接触面的滑动摩擦。

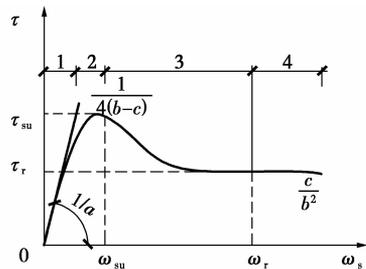
随着接触面滑移增加,接触面处红层泥岩的原结构被破坏,越来越多的破碎的土体颗粒嵌入到混凝土表面的凸凹缝中,从而使剪切过程中红层泥岩与混凝土接触面逐渐向平面剪切过度,表现为应变软化特征,此阶段为软化阶段。

最后,混凝土的凸凹缝逐渐被破碎的土体填满,而使得剪切过程中红层泥岩与混凝土接触面接近平面剪切,此时剪切强度主要由破坏后的红层泥岩与混凝土接触面存在的滑动摩擦提供,因此,剪应力随着剪切位移的增加而最终趋于稳定,此阶段为残余阶段。

2 接触面本构模型

2.1 接触面本构模型

根据室内桩-岩接触面剪切试验曲线呈现出:弹性阶段、塑性阶段、应变软化阶段和残余摩擦阶段 4 个阶段的特征,基于经典双曲线接触面本构模型^[5],建立以相对位移为变量的桩-岩接触面应变软化本构模型,其关系曲线如图 7 所示。



注: 1.弹性阶段; 2.塑性阶段; 3.软化阶段; 4.残余阶段

图 7 桩-岩接触面应变软化模型剪应力与剪切位移 ($\tau-\omega_s$) 关系曲线

Fig. 7 Shear stress-displacement curves of strain softening model on pile-rock interface

本构方程表达式为

$$\tau = \frac{\omega_s(a + c\omega_s)}{(a + b\omega_s)^2} \quad (1)$$

式中: τ 为接触面平均剪应力; ω_s 为相对剪切位移; a 、 b 、 c 为试验参数,均大于零。

对表达式两端求导,得

$$\frac{\partial \tau}{\partial \omega_s} = \omega_s(b\omega_s + a)[(2c - b)\omega_s + a] \quad (2)$$

令 $\frac{\partial \tau}{\partial \omega_s} = 0$, 则 $\omega_s = 0, \omega_s = -\frac{b}{a}$ (舍弃), $\omega_s = a/(b-2c)$ 。所以当 $\omega_{su} = a/(b-2c)$ 时, 剪应力取得最大值 τ_{su} 。

求得极限剪应力为

$$\tau_{su} = \frac{\omega_s(a + c\omega_s)}{(a + b\omega_s)^2} \Big|_{\omega_s = \frac{a}{b-2c}} = \frac{1}{4(b-c)} \quad (3)$$

求得残余应力为

$$\tau_r = \lim_{\omega_s \rightarrow \infty} \tau = \lim_{\omega_s \rightarrow \infty} \frac{c\omega_s^2 + a\omega_s}{a^2 + 2ab\omega_s + b^2\omega_s^2} = \lim_{\omega_s \rightarrow \infty} \frac{c + \frac{a}{\omega_s}}{\frac{a^2}{\omega_s^2} + \frac{2ab}{\omega_s} + b^2} = \frac{c}{b^2} \quad (4)$$

从桩-岩接触面应变软化本构模型方程可以看出: 当 $b = c$ 时, 表达式即为双曲线接触面本构模型公式: $\tau = \frac{\omega_s}{a + b\omega_s}$; 当 $b \neq c$ 时, 表现为应变软化特征。

2.2 参数的确定

令残余强度 $\tau_r = \beta\tau_{su}$, 则: 当 $\beta = 1$ 时, 接触面剪应力-剪切位移 ($\tau-\omega_s$) 关系为双曲线接触面模型; 当 $\beta < 1$ 时, 接触面剪应力-剪切位移 ($\tau-\omega_s$) 关系为应变软化接触面本构模型。由式(5)可求得参数 a, b, c , 见式(6)。

$$\begin{cases} \frac{b}{c^2} = \beta\tau_{su} \\ \omega_{su} = \frac{a}{b-2c} \\ \tau_{su} = \frac{1}{4(b-c)} \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} a = \frac{(\beta-1 + \sqrt{1-\beta})\omega_{su}}{2\beta\tau_{su}} \\ b = \frac{1 - \sqrt{1-\beta}}{2\beta\tau_{su}} \\ c = \frac{2 - \beta - 2\sqrt{1-\beta}}{4\beta\tau_{su}} \end{cases} \quad (6)$$

综上所述, 确定 a, b, c 试验参数, 需要用到极限剪切位移 ω_{su} , 极限剪应力 τ_{su} , 残余强度 τ_r , 通过直剪试验结果, 可以得到此 3 个参数, 然后通过公式求出参数 a, b, c 。

3 数值分析

有限差分软件 FLAC^{3D} 自带的 Interface 接触面单元, 它是基于理想弹塑性 Coulomb 滑动本构关系的无厚度接触单元, 无法模拟桩岩接触面在弹性阶段表现出的非线性, 以及在塑性阶段表现出的应变

软化等特征^[19]。因此, 利用 fish 语言对 FLAC^{3D} 中自带的接触单元进行二次开发, 并应用开发的模型对桩岩接触面直剪试验进行了数值模拟, 分析剪应力与剪切位移之间的关系, 对桩-岩接触面应变软化本构模型的准确性进行验证。

3.1 FLAC^{3D}接触单元的二次开发

利用 fish 语言将桩-岩接触面应变软化本构模型植入到 FLAC^{3D} 中, 由此建立新接触面单元计算流程图如图 8 所示。

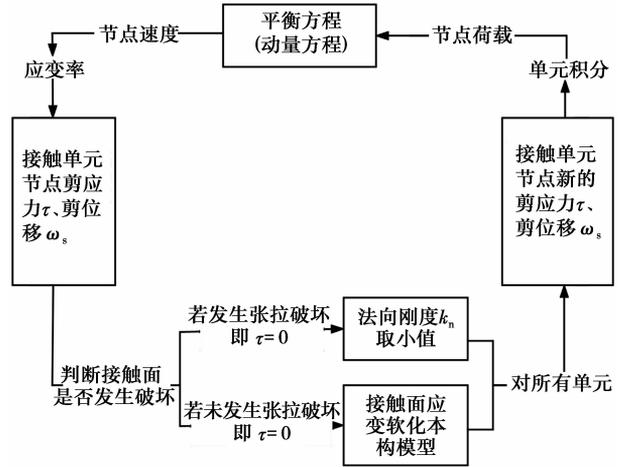


图 8 桩-岩接触面本构模型计算流程图

Fig. 8 Calculation flow chart for constitutive model of pile-rock interface

FLAC^{3D} 桩-岩接触面本构模型计算循环步骤图如下:

- 1) 先在指定表面节点施加集中荷载, 产生的表面位移转化为节点速度, 再通过节点速度计算新的应变率, 从而得到接触面单元节点剪应力, 剪切位移;
- 2) 利用接触面剪应力的取值判定接触面是否发生破坏, 即若, 通过接触面应变软化本构模型计算新的接触面单元节点剪应力和剪切位移; 若, 则桩-岩接触面发生破坏, 自动赋予法向刚度较小值;
- 3) 由上一步得到新的应力和荷载, 通过动量方程计算新的节点速度和应变率。

不断重复上述 3 个步骤, 在计算过程中, 如果记录的最大不平衡力接近零或者为常数, 则停止计算。

3.2 数值验证

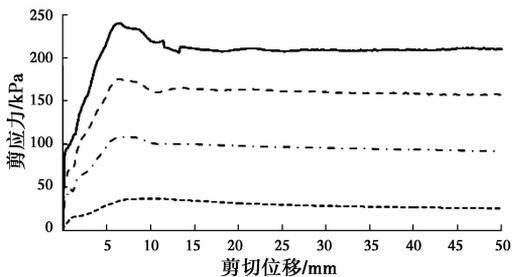
参照室内剪切试验条件, 利用 FLAC^{3D} 建立模型, 选取粗糙度 I 条件, 法向应力分别为 50、150、250、350 kPa 进行数值模拟。所建模型如图 9 所示。



图9 数值模拟计算模型

Fig. 9 Model for numerical simulation

对数值模拟结果进行整理,作出不同法向应力作用下,桩岩接触面剪应力-剪切位移曲线如图10所示。



注: ---- 50 kPa - · - 150 kPa - - - 250 kPa — 350 kPa

图10 粗糙度 I 时桩岩接触面剪应力-剪切位移数值模拟曲线

Fig. 10 Simulation results for shear stress-displacement curves under roughness I

从图10中可以看出,在数值模拟中,加载初期,剪应力增加到一定程度后产生剪切位移,之后,剪应力随着剪切位移呈近似线性增加,在达到应力峰值后,随着剪切位移增大,剪应力反而降低,并最终趋于稳定值。

通过分析比较室内试验结果与数值模拟结果,可以看出桩岩接触面剪应力-剪切位移曲线趋势大致相同,都经历了弹性阶段、塑性阶段、应变软化阶段和残余摩擦阶段4个阶段。表明剪应力-剪切位移曲线呈现出一定的应变软化特征,证明了该本构能够较好地模拟接触面间的应变软化特性。

4 结论

通过室内桩-岩接触面剪切试验,结合理论分析和有限差分数值模拟等方法,针对我国西南地区广泛分布的红层泥岩地层,从桩-岩相互作用出发,对桩-岩接触面力学性质进行研究,得出以下结论:

1)通过室内桩-岩接触面剪切试验,无论有无泥皮、何种粗糙度,接触面剪应力-剪切位移曲线都出现拐点,在剪应力达到峰值强度后开始降低并最终趋于稳定值。3种混凝土表面粗糙度情况下接触面

的剪应力-剪切位移曲线都表现出应变软化的特征。

2)根据接触面剪切试验成果,建立桩-岩接触面应变软化本构模型,并推导其本构方程。

3)利用 fish 语言对 FLAC^{3D} 中自带的理想弹塑性接触单元进行二次开发,并应用开发的模型对桩-岩接触面剪切试验进行了数值模拟,分析剪应力与剪切位移之间的关系,证明了该本构能够较好地模拟接触面间的应变软化特性。

参考文献:

- [1] 杨宗才,张俊云,周德培. 红层泥岩边坡快速风化特性研究[J]. 岩石力学与工程学报,2006,25(2):275-283.
YANG Z C, ZHANG J Y, ZHOU D P. Study on fast weathering characteristics of red bed mudstone slope [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006,25(2):275-283. (in Chinese)
- [2] 冯强. 四川红层泥岩的分布及其路用性能研究[D]. 成都:西南交通大学,2011.
FENG Q. The distribution and road behavior of Sichuan red mudstone [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University,2011. (in Chinese)
- [3] POTYONDY J G. Skin friction between various soils and construction materials [J]. Géotechnique, 1961, 11(4):339-353.
- [4] MAYORAL J M, PESTANA J M, SEED R B. Modeling clay-pile interface during multi-directional loading [J]. Computers and Geotechnics, 2016, 74: 163-173.
- [5] CLOUGH G W, DUNCAN J M. Finite element analyses of retaining wall behavior [J]. Asce Soil Mechanics & Foundation Division Journal, 1973, 97 (12):1657-1673.
- [6] BRANDT J R T. Behavior of soil-concrete interfaces [D]. Edmonton, Canada: University of Alberta, 1985.
- [7] BOULON M. Basic features of soil structure interface behavior [J]. Computers and Geotechnics, 1989, 7 (1): 115-131.
- [8] 张冬霖,卢廷浩. 一种土与结构接触面模型的建立及其应用[J]. 岩土工程学报,1998(6):65-69.
ZHANG D J, LU T H. Establishment and application of an interface model between soil and structure [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,1998(6): 65-69. (in Chinese)
- [9] D'AGUIAR S C, MODARESSI-FARAHMAND-RAZAVI A, SANTOS J A D, et al. Elastoplastic constitutive modelling of soil-structure interfaces under

- monotonic and cyclic loading [J]. *Computers & Geotechnics*, 2011, 38(4):430-447.
- [10] 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 W, LU T H, ZHOU A Z. Constitutive model for negative simple-sheared soil-concrete interface [J]. *Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering*, 2011, 33(1):59-64. (in Chinese)
- [11] 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, 16(3):14-22.
YIN Z Z, ZHU H, XU G H. Numerical simulation of the deformation in the interface between soil and structural material [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1994, 16(3): 14-22. (in Chinese)
- [12] 张嘎,张建民. 粗粒土与结构接触面的静动本构规律[J]. *岩土工程学报*, 2005(5):516-520.
ZHANG G, ZHANG J M. Monotonic and cyclic constitutive law of interface between structure and coarse grained soil [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2005, 27(5): 516-520. (in Chinese)
- [13] 张嘎,张建民. 粗粒土与结构接触面三维本构关系及数值模型[J]. *岩土力学*, 2007, 28(2):288-292.
ZHANG G, ZHANG J M. Three-dimensional model of interface between structure and coarse grained soil [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(2): 288-292. (in Chinese)
- [14] 冯大阔,侯文峻,张建民. 粗粒土与结构接触面三维力学特性的直剪试验研究[J]. *土木工程学报*, 2012(5): 169-175.
FENG D K, HOU W J, ZHANG J M. Large scale direct shear test investigation of the 3D behavior of a gravel structure interfaces [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2012(5): 169-175. (in Chinese)
- [15] 舒丹. 内河软岩地基框架码头桩基承载特性研究[D]. 重庆:重庆交通大学, 2015.
SHU D. Study on bearing characteristics of pile in soft rock foundation with frame wharf in inland river [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2015. (in Chinese)
- [16] WU H, SHU Y, ZHU J. Implementation and verification of interface constitutive model in FLAC 3D [J]. *Water Science and Engineering*, 2011, 4(3): 305-316.
- [17] 金长宇,张春生,冯夏庭. 非线性弹性-硬化接触本构模型在层间错动带中的研究[J]. *水力发电学报*, 2013(1):206-211, 217.
JIN C Y, ZHANG C S, FENG X T. Study and application of nonlinear elastic-harden contact constitutive model to disturbed belt [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2013(1): 206-211, 217. (in Chinese)
- [18] 郑文华,刘德军. 基于 FLAC^{3D} 二次开发的不连续变形模拟方法探讨[J]. *岩土工程学报*, 2013(Sup1): 197-202.
ZHENG W H, LIU D J. Discussion of discontinuous deformation simulation method based on secondary development of FLAC^{3D} [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013(Sup1): 197-202. (in Chinese)
- [19] 刘莹骏,张运良. 一种薄层接触单元的开发及 FLAC^{3D} 实现[J]. *水利与建筑工程学报*, 2014(4):1-8, 49.
LIU Y J, ZHANG Y L. Development of a thin-layer interface element and its implementation in FLAC^{3D} [J]. *Journal of Water Resources and Architecture Engineering*, 2014(4):1-8, 49. (in Chinese)
- [20] 刘蓓. 红粘土与混凝土结构接触面力学特性的试验研究[D]. 长沙:中南大学, 2013.
LIU P. The test study on mechanical properties of interface between red clay and concrete structure [D]. Changsha: Central South University, 2013. (in Chinese)
- [21] 曾卫,何淼. 混凝土表面粗糙度对梁耐热性能影响的实验研究[J]. *四川建筑*, 2010(5):160-161, 164.
ZENG W, HE M. Experiment study on thermal resistant property of beam effected by concrete surface roughness [J]. *Sichuan Architecture*, 2010(5): 160-161, 164. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)