

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2019.02.008

带肋钢筋与堆石料接触面剪切特性

何 亮^{1,2}, 李国英², 李雄威¹

(1. 常州工学院土木建筑工程学院, 江苏 常州 213032; 2. 南京水利科学研究院岩土工程研究所, 江苏 南京 210029)

摘要:设计了一种用于堆石料中筋材拉拔试验的试验装置,并开展了带肋钢筋在堆石料中的一系列拉拔试验,研究钢筋-堆石料接触面的剪切特性。试验结果表明:接触面的剪应力-剪切位移关系曲线均呈明显的非线性关系,形状类似于下端开口的抛物线;堆石料上覆压力对试验结果影响较大,随着上覆压力的增加,峰值和残余剪应力均逐渐增加,但峰值剪切位移逐渐减小。此外,基于损伤力学理论建立了一个接触面损伤本构模型,该模型能较好地模拟上覆压力对接触面剪切特性的影响,以及剪应力-剪切位移曲线的应变硬化、应变软化、残余状态等非线性特征。

关键词:接触面;加筋;拉拔试验;损伤本构模型;剪切特性;堆石料

中图分类号:TU411 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2019)02-0138-06

Shear characteristics of the contact surface between ribbed bars and rockfill materials

HE Liang^{1,2}, LI Guoying², LI Xiongwei¹

(1. School of Civil Engineering, Changzhou Institute of Technology, Changzhou 213032, China;
2. Geotechnical Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: A test device for the pullout test of reinforced bar in the rockfill has been designed. After that, a series of pullout tests for the ribbed steel bars in rockfill were carried out, and the shear characteristics of contact interface in the reinforced rockfill were studied. The experimental results show that the relationship curves between shear stress and shear displacement of the contact surface is obviously nonlinear, and the shape is similar to the parabola at the lower end. Meanwhile, the influence of overburden pressure on the test results is larger, and the peak and residual shear stress increases with the increase of overburden pressure, while the peak shear displacement decreases gradually. In addition, a damage constitutive model of contact surface is established based on the theory of damage mechanics, which can better simulate the influence of overlying pressure on the shear characteristics of contact surface and the nonlinear characteristics including the strain hardening, the strain softening and the residual state.

Key words: contact surface; reinforcement; pullout test; damage constitutive model; shear characteristic; rockfill

高土石坝遭受强震作用时,坝顶部往复地震惯性力较大可能会导致坝顶区域的堆石料松动,从而降低大坝的抗震稳定性,因此有必要对坝顶区域采取合理的抗震加固措施^[1]。混凝土锚筋框架梁是一种有效的坝顶加筋抗震加固措施(图1),依靠锚筋的强大拉力和框架梁的箍束作用,限制堆石料的地震永久变形,增强土石坝坝顶区域的抗震稳定性。

混凝土锚筋框架梁对大坝的抗震加固效果主要取决于锚筋在堆石料中的锚固作用,该锚固作用可具体表现为锚筋与堆石料在两者接触面上的剪切特性。虽然目前筋材与填料接触面剪切特性的研究成果较为丰

基金项目:水利部公益性行业科研专项(201501035);水利部土石坝破坏机理与防控技术重点实验室开放基金(YK319009);常州工学院重点科研基金(YN1709)

作者简介:何亮(1983—),男,讲师,博士,主要从事土石坝抗震加固研究。E-mail: springday_2007@163.com

引用本文: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.

富,如 Lopes 等^[2]开展了土工格栅在砂土中的拉拔试验,认为格栅与砂接触面抗剪强度随着剪切速率的提高而增强;Mohiuddin^[3]认为筋材长度和法向压力会显著影响土工格栅在黏土中的拉拔试验结果;王协群等^[4]研究了土工格栅材料类型、填料类型、压实度、含水率和剪切速率 5 个因素对直剪试验结果的影响规律;一些学者研究了试验箱边界效应^[5]、拉拔装置^[6-9]、含水率^[10]、粗糙度^[11]、土工格栅横肋^[12]等因素对筋材与填料接触面剪切试验结果的影响。上述研究主要集中于柔性筋材与土体接触面的试验研究,筋材为锚筋等刚性材料、填料为堆石料的试验研究尚未见到相关报道。

筋材与填料在接触面上相互作用关系较为复杂,接触面剪切试验获得的剪应力与剪切位移曲线通常有明显的应变硬化、应变软化和残余剪切强度特性。相比常规的线弹性和非线性模型,基于损伤理论建立的本构模型在一定程度上能更好地模拟筋材与填料接触面复杂的剪应力与剪应变关系。现有的接触面损伤本构模型主要依据土与结构接触面试验建立,如胡黎明等^[13]、张嘎等^[14]建立了描述粗粒土与结构接触面力学特性的弹塑性损伤模型;曹文贵等^[15]、杨林德等^[16]、夏红春等^[17]建立了土与结构接触面的统计损伤本构模型,但这些模型是否能有效地模拟刚性筋材与堆石料接触面的剪切特性,尚未见到相关报道。

基于以上分析,笔者选用带肋钢筋作为锚筋材料,设计拉拔试验装置和试验方案,开展一系列钢筋在堆石料中的拉拔试验,研究钢筋与堆石料接触面的剪切特性,以及能够有效地模拟接触面剪应力和剪切位移关系的损伤本构模型。

1 试验装置的研制

在堆石料中进行带肋钢筋的拉拔试验有其特殊性,主要有以下 3 点:首先,在加筋土石坝工程中,筋材的铺设位置通常为 1/4 坝高以上,也就意味着在 200 m 高的加筋土石坝中,最下层筋材上覆压力可达到 1 MPa,传统的拉拔试验装置无法提供如此高的压力;其次,堆石料属于粗粒土,颗粒尺寸较大,必须在试验箱中采用高强度振动碾压才能使其达到较大干密度,为了避免对试验装置中其他部位的损坏,试验箱应设计为可脱离体;最后,在整个堆石料装样过程中,带肋钢筋应保持水平,且不同直径的带肋钢筋与拉杆之间能够方便地刚性连接。

基于上述原因,传统的拉拔试验装置难以实现带肋钢筋在堆石料的拉拔试验,因此需要自行研制新的拉拔试验装置(图 2)。试验圆筒内径为 36.6 cm,内高为 61 cm,筒的壁厚为 4 cm。筒壁对称设置供带肋钢筋穿过的圆孔,圆孔直径为 5 cm,其中心点距筒内底部的距离为 25 cm。

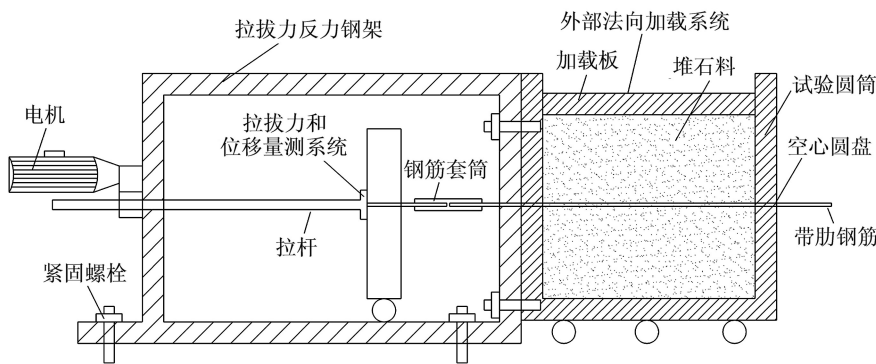


图 2 试验装置示意图
Fig.2 Schematic diagram of the test device

2 试验方案

试验所用带肋钢筋的直径为 25 mm,由于钢筋属于高模量材料,试验中不考虑钢筋的变形。试验所用堆

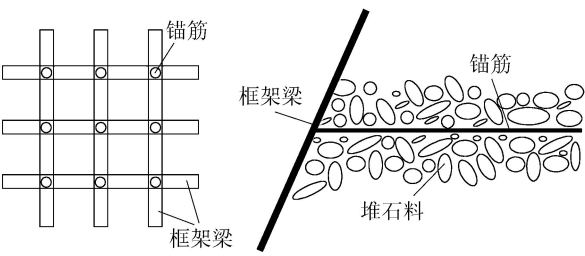


图 1 混凝土锚筋框架梁加固措施示意图
Fig.1 Schematic diagram of reinforcement measures for the bar frame beam with concrete anchor

石料为某面板堆石坝的主堆石料,试验中钢筋上方的堆石料厚度为 25 cm,堆石料的相对密度均为 2.71,最大粒径为 60 mm,分 60 ~ 40 mm、40 ~ 20 mm、20 ~ 10 mm、10 ~ 5 mm、<5 mm 共 5 种粒径范围进行试样称取,将备好的试样分成 5 等份,混合均匀,级配曲线如图 3 所示。试验中堆石料均为风干状态,孔隙率均为 20%,堆石料上覆压力分别为 50 kPa、200 kPa、400 kPa 和 800 kPa,电机施加的拉拔速率均为 2 mm/min。

试验步骤如下:(a)按设计的级配配置堆石料,分 4 层振动碾压至设计孔隙率。当第 2 层振动碾压完成后,将钢筋穿过筒壁两侧的圆孔埋入堆石料中,随即用橡胶圆盘堵住两侧圆孔,再继续分层碾压余下 2 层堆石料至设计高度。每次试验均应保证堆石料碾压完成后钢筋呈水平放置状态且外露筒壁的长度相同。(b)利用大型三轴仪对堆石料顶部的加载板施加设计的上覆压力,待上覆压力稳定后用钢筋连接套筒连接带肋钢筋和拉杆,随后放置位移百分表和拉力数显器。(c)启动电机对钢筋施加水平拉拔力,同时拍摄钢筋位移和钢筋所受拉力的同步视频。(d)试验结束后将拉拔力卸载至零,松开钢筋连接套筒,卸载上覆压力,倒出堆石料,拔出钢筋,重新配置堆石料,进行下一次试验。

3 钢筋与堆石料接触面剪切特性

拉拔试验获得的数据为接触面上拉拔力及与其对应的剪切位移。将拉拔力除以钢筋长度和截面周长换算为剪应力,可绘制出不同上覆压力下的剪应力-剪切位移关系曲线,如图 4 所示。由图 4 可知:(a)曲线均呈明显的非线性关系,形状类似于下端开口的抛物线。由于堆石料对钢筋包裹紧密,曲线的上升阶段实质为堆石料的剪胀过程,较小的剪切位移会产生较大的剪应力。此后,随着剪切位移的继续增大,剪应力达到峰值,接触面完全被剪切破坏。(b)曲线下降阶段的主要特征:随着剪切位移的增大,剪应力逐渐减小,曲线坡度逐渐变缓,最后进入残余剪应力阶段。然而残余剪应力数值会波动,推测原因为堆石料颗粒在拉拔过程中翻滚所至。(c)堆石料上覆压力对试验结果的影响较大,随着上覆压力增加,峰值剪应力和残余剪应力均逐渐增加,50 kPa 上覆压力的峰值剪应力仅为 800 kPa 上覆压力的 50%。

进一步对试验数据进行深入分析,绘制接触面峰值和残余剪应力-上覆压力、峰值剪切位移-上覆压力关系曲线,如图 5 和图 6 所示。由图 5 可知,峰值和残余剪应力-上覆压力曲线均近似呈线性正比关系,由于剪胀作用的影响,峰值剪应力-上覆压力曲线的斜率明显大于残余剪应力-上覆压力曲线的斜率。在剪应力随剪切位移上升的阶段,上覆压力对堆石料的剪胀抑制作用显著,但当剪应力进入残余剪应力阶段,形成了破坏通道后,剪胀作用减弱明显。由图 6 可知,峰值剪切位移-上覆压力关系曲线近似呈线性反比关系,上覆压

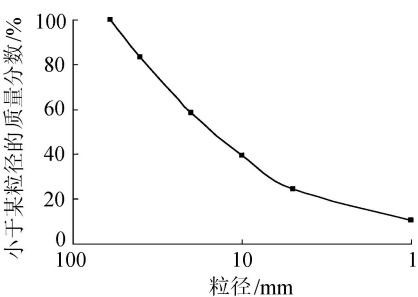


图 3 堆石料级配曲线
Fig. 3 Gradation curve of rockfill

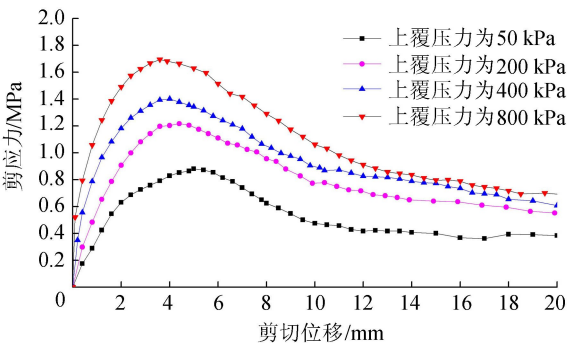


图 4 剪应力-剪切位移关系曲线
Fig. 4 Relationship between the shear stress and the pullout displacement

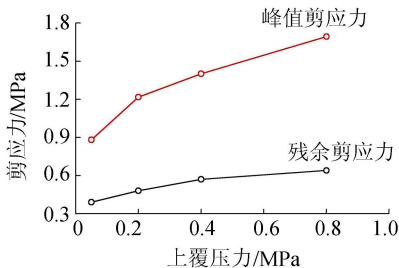


图 5 峰值和残余剪应力-上覆压力关系曲线
Fig. 5 Relationship between the peak value, the residual shear stress and the overburden pressure

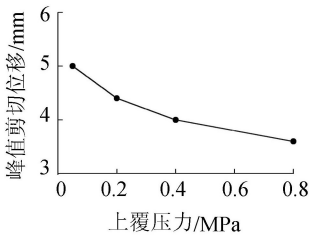


图 6 峰值剪切位移-上覆压力关系曲线
Fig. 6 Relationship between the peak outlout displacement and the overburden pressure

力越大,堆石料对钢筋的束缚越强,接触面受剪时越容易达到峰值剪应力,峰值剪应力对应的剪切位移越小。

4 接触面损伤本构模型

为描述锚筋-堆石料接触面剪应力随剪切位移变化的规律,基于损伤力学的基本原理建立接触面损伤本构模型,模型有以下假设:(a)接触面的损伤过程为完全无损的接触面向完全损伤的接触面演化过渡的过程,损伤始于钢筋拉力开始施加的时刻,终止于接触面剪应力进入残余剪应力状态,损伤因子的演化过程为非线性。(b)损伤过程中接触面为无损接触面和损伤接触面共同组成的复合体,两者共同承担外荷载,两者的应变始终相同。

定义损伤因子 D 为损伤接触面所占面积与总接触面面积的比值,则接触面上的剪应力 τ 为

$$\tau = (1 - D)\tau_i + D\tau_d \tag{1}$$

式中: τ_i ——无损接触面上的剪应力; τ_d ——完全损伤接触面上的剪应力。

假设剪切面厚度为堆石料最大粒径 $d_{\max} = 60\text{ mm}$,则剪应变 $\gamma = w/d_{\max}$,其中 w 为拉拔位移。 τ_i 与 γ 应为线弹性关系:

$$\tau_i = G\gamma \tag{2}$$

式中: G ——初始弹性剪切模量,其大小等于剪应力-剪应变关系曲线上初始线弹性阶段的斜率。

τ_d 为拉拔试验中的残余剪应力,其合法向压力 σ_n 大致符合摩尔-库伦强度理论,即

$$\tau_d = c_n + \sigma_n \tan \varphi_n \tag{3}$$

式中: c_n ——残余黏聚力; φ_n ——残余内摩擦角。

由于 D 的演化过程即为钢筋在堆石料中的拉拔过程,因此 D 的取值范围应为 $0 \sim 1$,当 $w = 0$ 时, $D = 0$;当 $w = \infty$ 时, $D = 1$ 。参考统计损伤本构模型理论^[16-19],定义损伤因子的演变方程为

$$D = 1 - \exp(-a\gamma^b) \tag{4}$$

式中: a 、 b ——无量纲参数。

将式(2)~(4)代入式(1),可得到接触面损伤本构模型的表达式:

$$\tau = (G\gamma - \tau_d)\exp(-a\gamma^b) + c_n + \sigma_n \tan \varphi_n \tag{5}$$

参数 a 、 b 是建立损伤本构模型的关键。由图4可知,接触面在剪切变形过程中具有应变软化特性,故可根据其极值特性建立下式:

$$\left. \frac{\partial \tau}{\partial \gamma} \right|_{\tau=\tau_f, \gamma=\gamma_f} = G + (G\gamma_f - \tau_n)(-ab\gamma_f^{b-1}) = 0 \tag{6}$$

同时,将 $\gamma = \gamma_f$ 和 $\tau = \tau_f$ 代入式(5)依然是成立的,将其与式(6)联立求解,得到参数 a 和 b 为

$$b = \frac{G\gamma_f}{(\tau_n - G\gamma_f) \ln\left(\frac{\tau_f - \tau_n}{G\gamma_f - \tau_n}\right)} \quad a = \frac{-\ln\left(\frac{\tau_f - \tau_n}{G\gamma_f - \tau_n}\right)}{\gamma_f^b} \tag{7}$$

式中: τ_f ——峰值剪应力; γ_f ——峰值剪应变。

τ_f 与 σ_n 也大致符合摩尔-库伦强度理论,即

$$\tau_f = c_f + \sigma_n \tan \varphi_f \tag{8}$$

式中: c_f ——峰值黏聚力; φ_f ——峰值内摩擦角。

假设峰值剪应变 γ_f 和初始弹性剪切模量 G 与法向压力 σ_n 均为线性关系,即

$$\gamma_f = \gamma_0 + \eta\sigma_n \quad G = G_0 + \nu\sigma_n \tag{9}$$

式中: γ_0 、 η 、 G_0 、 ν ——拟合参数。

将式(7)~(9)代入式(5)即可得到接触面损伤本构模型的完整表达式,模型共有8个参数,参数确定的方法如下:(a)依据 $\gamma = w/d_{\max}$ 将图4转换为剪应力-剪应变关系曲线,获得不同法向应力下的 G ,再结合式(9)拟合得到参数 G_0 和 ν 。(b)依据式(3)和式(8),拟合图5中残余剪应力和峰值剪应力与法向应力关系,得到 c_n 、 φ_n 、 c_f 和 φ_f 参数。(c)依据 $\gamma = w/d_{\max}$ 将图6转换为剪应变-上覆压力关系曲线,再结合式(9)拟合得到 γ_0 和 η 参数。最后得到的8个接触面损伤本构模型参数如下: $G_0 = 0.25\text{ MPa}$ 、 $\nu = 6.37$ 、 $c_n = 0.45\text{ MPa}$ 、 $\varphi_n =$

14.2°、 $c_f = 1.07 \text{ MPa}$ 、 $\varphi_f = 38.17^\circ$ 、 $\gamma_0 = 8.14$ 、 $\eta = -2.906 \text{ MPa}^{-1}$ 。

对比试验结果和损伤本构模型模拟的曲线(图 7,将横坐标均转换为剪切位移)可知模型曲线虽然在数值上与试验结果有一定的偏差,但能较好地模拟钢筋与堆石料接触面的剪切特性,具体表现在:(a)能反映剪应力-剪切位移曲线的应变硬化、应变软化和趋向残余状态的非线性过程。(b)能反映峰值和残余剪应力随上覆压力的增大而增大、峰值剪切位移随上覆压力的增大而减小的特征。(c)无法模拟试验结果中残余剪应力随剪切位移增长的波动情况。

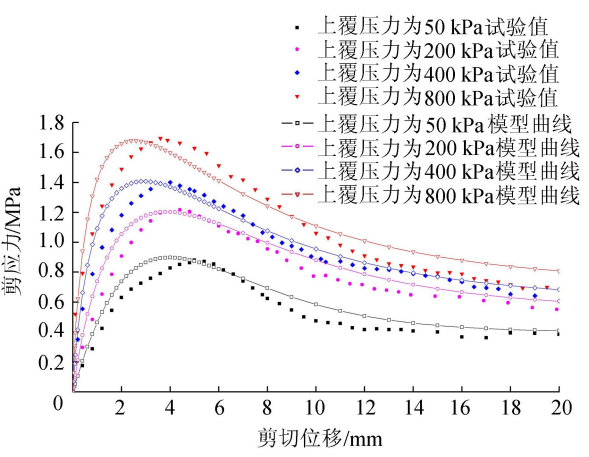


图 7 试验曲线和损伤模型曲线对比

Fig. 7 Comparison of test curves and damage model curves

5 结 论

a. 钢筋与堆石料接触面的剪应力-剪切位移关系曲线

均呈明显的非线性关系,形状类似于下端开口的抛物线。曲线的上升阶段实质为堆石料的剪胀过程,较小的剪切位移能够产生较大的剪应力;曲线下降阶段的坡度缓于上升阶段,且随着剪切位移的增大,剪应力逐渐进入残余剪应力阶段,但受剪切过程中堆石颗粒翻滚的影响,残余剪应力数值不稳定。

b. 堆石料上覆压力对试验结果的影响较大。随着上覆压力的增加,峰值剪应力和残余剪应力均逐渐增加,而峰值剪应力对应的剪切位移逐渐减小;由于剪胀作用的影响,上覆压力对峰值剪应力的影响明显高于残余剪应力。

c. 本文建立的损伤本构模型能较好地模拟接触面剪应力随剪切位移的增大而表现出的应变硬化、应变软化、趋向残余状态的非线性规律,以及峰值和残余剪应力随上覆压力增大而增大的特性。

d. 由于试验仪器的限制以及时间有限,后续可改造或设计拉拔试验装置,开展土工格栅、钢筋网等网状筋材在堆石料中的拉拔试验,深入研究接触面剪切带的发展规律。

参考文献:

[1] 杨星,刘汉龙,余挺,等. 高土石坝复合加筋抗震加固技术开发与应用[J]. 水利水电科技进展,2016,36(6):69-74. (YANG Xing, LIU Hanlong, YU Ting, et al. Technological development of composite reinforcement aseismic measure for high earth rockfill dams and its application[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2016, 36(6):69-74. (in Chinese))

[2] LOPES M L, LADRIRA M. Influence of the confinement, soil density and displacement rate on soil geogrid interaction[J]. Geotextiles and Geomembranes, 1996, 14(10): 543-554.

[3] MOHIUDDIN A. Ananysis of laboratory and field pull-out test of geosynthetics In clayed soils[D]. Baton: Louisiana State University, USA, 2003.

[4] 王协群,张俊峰,邹维列. 格栅-土界面抗剪强度模型及其影响因素[J]. 土木工程学报,2013,46(4):133-141. (WANG Xiequn, ZHANG Junfeng, ZOU Weilie. A shear strength model of geogrid-soil interface and its influence factors[J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(4): 133-141. (in Chinese))

[5] 杨广庆,李广信,张保俭. 土工格栅界面剪切特性试验研究[J]. 岩土工程学报,2006,28(8):948-952. (YANG Guangqing, LI Guangxin, ZHANG Baojian. Experimental studies on interface friction characteristics of geogrids[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(8): 948-952. (in Chinese))

[6] 徐超,廖星樾,叶观宝,等. 土工合成材料界面摩擦特性的室内剪切试验研究[J]. 岩土力学,2008,29(5):1285-1289. (XU Chao, LIAO Xingyue, YE Guanbao, et al. Research on interface frictional characteristics of geosynthetics[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(5):1285-1289. (in Chinese))

[7] JURAN I, GUERMAZI A, CHEN C L. et al. Modeling and simulation of load transfer in reinforced soil, part I[J]. International Journal of Numerical Analysis and Methods in Geomechanics, 1988, 12(2): 141-155.

[8] 张绪涛,张强勇. 土工直接拉伸试验装置的研制及应用[J]. 岩土工程学报,2014,36(7):1309-1315. (ZHANG Xutao,

- ZHANG Qiangyong. Development and application of geotechnical direct tensile test device[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(7): 1309-1315. (in Chinese))
- [9] 吴海民,束一鸣. 土工合成材料双向拉伸多功能试验机的研制与初步应用[J]. 岩土工程学报,2014,36(1):170-175. (WU Haimin, SHU Yiming. Geosynthetic materials development and preliminary application of two way stretch multi-function testing machine[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(1): 170-175. (in Chinese))
- [10] 施建勇,李砚. 糙面土工膜与无纺土工织物界面剪切强度及表面粗糙度变化规律[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2016,44(3):214-218. (SHI Jianyong, LI Yan. Interface shear strength of textured geomembrane with nonwoven geotextile and change pattern of surface asperity[J]. Journal of Hohai University(Natural sciences), 2016, 44(3): 214-218. (in Chinese))
- [11] 梁越,储昊,曾超. 干湿循环作用下钢-土界面剪切特性试验[J]. 水利水电科技进展,2016,36(1):49-52. (LIANG Yue, CHU Hao, ZENG Chao. Experimental study on shear characteristics at steel-soil interface with drying-wetting cycles[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2016, 36(1): 49-52. (in Chinese))
- [12] BERGADO D T, HARDIYATIMO H C, CISNEROS C B, et al. Pullout resistance of steel geogrids with weathered clay as back fill material[J]. Geotechnical Testing Journal, 1992, 15(1): 33-46.
- [13] 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))
- [14] 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 Ga, ZHANG Jianmin. Three-dimensional model of interface between structure and coarse grained soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007,28(2):288-292. (in Chinese))
- [15] 曹文贵,王江营,翟友成. 考虑残余强度影响的结构面与接触面剪切过程损伤模拟方法[J]. 土木工程学报,2012,45(4):127-133. (CAO Wengui, WANG Jiangying, ZHAI Youcheng. Study of simulation method for the shear deformation of rock structural planes and interfaces with consideration of residual strength[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(4): 127-133. (in Chinese))
- [16] 杨林德,刘齐建. 土-结构物接触面统计损伤本构模型[J]. 地下空间与工程学报,2006,2(1):79-82. (YANG Linde, LIU Qijian. Research on statistical damage model for soil structure interface[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2006, 2(1): 79-83. (in Chinese))
- [17] 夏红春,周国庆,商翔宇. 基于Weibull分布的土-结构接触面统计损伤软化本构模型[J]. 中国矿业大学学报,2007,36(6):734-737 (XIA Hongchun, ZHOU Guoqing, SHANG Xiangyu. Statistical damage softening constitutive model of soil-structure interface based on Weibull random distribution[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2007, 36(6): 734-737 (in Chinese))
- [18] 王保田,周炳生,周天宝,等. 基于统计损伤理论的锚杆受力全历程分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2018,46(4):314-321. (WANG Baotian, ZHOU Bingsheng, ZHOU Tianbao, et al. Analysis of the whole course for the force transferring mechanism in anchor bar based on statistical damage constitutive theory[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2018,46(4):314-321. (in Chinese))
- [19] 郑山锁,张晓辉,黄威曾,等. 多龄期钢框架时变损伤模型研究[J]. 地震工程学报,2018,40(3):389-397. (ZHENG Shansuo, ZHANG Xiaohui, HUANG Weizeng, et al. Study on time-varying damage model of multi-age steel frame structures[J]. China Earthquake Engineering Journal,2018,40(3):389-397. (in Chinese))

(收稿日期:2018-01-20 编辑:刘晓艳)