

DOI:10.11918/202303043

# 膨胀土巴西劈裂强度及其破坏能量演化规律

张思钰<sup>1</sup>,张勇敢<sup>1</sup>,刘斯宏<sup>1,2</sup>,鲁洋<sup>1,2</sup>

(1. 河海大学 水利水电学院,南京 210098;2. 大坝长效特性及环保修复技术中西联合实验室(河海大学),南京 210098)

**摘要:**为探究膨胀土的抗拉强度及破坏特征演化规律,完整描述其拉伸破坏特性,通过试验验证巴西劈裂试验在膨胀土试样抗拉强度测定中的适用性,并在此基础上较为系统地探讨含水率和干密度对膨胀土抗拉强度及加载过程中能量演变的影响。结果表明:巴西劈裂试验对试验范围内的重塑膨胀土样具有较好适用性;试样抗拉强度随含水率升高而减小,且干密度越大减幅越大,随初始干密度增加而增大,且含水率越高增幅越小;膨胀土试样的破坏能与抗拉强度具有类似的变化趋势,但存在一“临界含水率”使得破坏能随含水率增加近似呈现双线性降低趋势,且该“临界含水率”随试样初始干密度的增加而增大。研究结果拓展了巴西劈裂试验的应用范围,并得到了将能量指标作为土体抗破坏能力辅助指标的工程启示。

**关键词:**膨胀土;巴西劈裂试验;临界含水率;抗拉强度;破坏能

中图分类号: TU443

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2023)11-0125-10

## Evolution of Brazilian splitting tensile strength and its associated fracture energy in expansive soil

ZHANG Siyu<sup>1</sup>, ZHANG Yonggan<sup>1</sup>, LIU Sihong<sup>1,2</sup>, LU Yang<sup>1,2</sup>

(1. College of Water Conservancy and Hydropower, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. International Joint Laboratory of Long-term Behaviour & Environmentally Friendly Rehabilitation Technologies on Dams(Hohai University), Nanjing 210098, China)

**Abstract:** In order to explore the tensile strength and the evolution of fracture characteristics of expansive soil, this study aims to provide a comprehensive description of tensile failure characteristics. The applicability of Brazilian splitting test in the determination of tensile strength of expansive soil samples was verified by experiments. Building upon this, effects of dry density and water content on tensile strength and energy evolution during the loading of expansive soil samples were systematically discussed. The results showed that the Brazilian splitting test was suitable for remodeled expansive soil samples within the test range. The tensile strength of soil decreased with the increase of water content, and the reduction is more significant with higher dry density. Besides, the tensile strength increased with the increase of initial dry density, and the increment became smaller with higher water content. The fracture energy of expansive soil samples has a similar trend to the tensile strength, but there is a “critical water content” at which the fracture energy showed an approximate bi-linear decrease with increasing water content. Moreover, the “critical water content” increased with the initial dry density of the samples. The research results have extended the application scope of the Brazilian splitting test and provided engineering insights on using energy index as the auxiliary measures for assessing of soil resistance to destruction.

**Keywords:** expansive soil; Brazilian splitting test; critical water content; tensile strength; destructive energy

膨胀土因富含蒙脱石、伊利石等黏土矿物而表现出显著的亲水性,对环境的温湿度变化十分敏感,呈现出随湿度、温度变化而反复胀缩、产生膨胀压力或收缩裂缝等现象,给工程的安全运维带来了严重危害。例如,近年来,建设在中强膨胀土区的高速铁路路基易产生上拱下沉等病害<sup>[1]</sup>;西南地区某大型膨胀土深基坑连续发生两次滑坡<sup>[2]</sup>;南水北调中线

工程发生了局部渠段膨胀土边坡变形、裂缝等问题<sup>[3]</sup>。事实上,上述张拉裂隙的形成与滑坡的出现均与膨胀土的抗拉强度密切相关。但在工程设计中土的抗拉强度指标往往被技术人员忽略。一方面是由于相对土的抗压和抗剪强度,抗拉强度数值较小;另一方面,土的抗拉强度测试对试验装置的精度要求较高且结果容易呈现出较大的离散性<sup>[4-5]</sup>。

收稿日期: 2023-03-15;录用日期: 2023-04-19;网络首发日期: 2023-09-20

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1235.T.20230919.1542.002>

基金项目: 国家自然科学基金(52109123,52279099);中央高校基本科研业务费专项资金(B220203029);江苏省研究生科研与实践创新计划(KYCX21\_0511)

作者简介: 张思钰(1999—),女,硕士研究生;刘斯宏(1964—),男,教授,博士生导师

通信作者: 鲁洋, [luy@hhu.edu.cn](mailto:luy@hhu.edu.cn)

巴西劈裂试验作为一种间接的抗拉强度测量方法,在岩石等脆性材料的抗拉强度测定中得到了广泛应用<sup>[6-10]</sup>。近年来,一些学者逐步尝试将其应用于土样的抗拉强度测试中,如文献[11]采用巴西劈裂试验对温度高于 $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的冻结黏土和冻结粉质黏土进行抗拉强度的测定与分析;文献[12]同样采用该方法系统研究了不同温度、干密度和含水率时冻结膨胀土的拉伸行为;文献[13]基于巴西劈裂试验探究了高吸力(较低含水率)下压实膨胀土抗拉强度的演化规律。然而,上述研究对象主要聚焦于脆性较强的冻土材料或高吸力试样,而膨胀土是一种高液限黏土,在较宽的含水率范围内表现出很强的塑性,因此采用巴西劈裂试验测定膨胀土抗拉强度时有必要对其适用性进行探讨。

土体的破坏特性受控于破坏应力与破坏应变的耦合效应,为综合考虑两者对土体破坏特性的影响,一些研究人员尝试将能量指标引入土体的破坏特性分析。例如,文献[14]采用破坏应变比能对静-动荷载作用下冻结黏土抵御破坏的能力进行对比分析;文献[15]研究了围压与含水率对冻结砂土破坏应变能密度的影响。总体而言,从能量角度研究土样破坏特性的相关报道还很少,尤其针对膨胀土的相关研究尚未涉及。

鉴于此,本文以南水北调中线叶县段膨胀土为研究对象,通过试验验证巴西劈裂试验在膨胀土试样抗拉强度测定中的适用性,并在此基础上较为系统地探讨含水率和干密度对膨胀土抗拉强度及加载过程中能量演变的影响,以期对膨胀土相关工程的病害防治提供参考。

## 1 试验土料与试样制备

### 1.1 试验土料

本次试验取用南水北调中线工程叶县附近段的膨胀土。按照土工试验方法标准<sup>[16]</sup>对该膨胀土进行基本物理特性测试,获得相关物性参数:该膨胀土最大干密度 $\rho_{dmax}$ 为 $1.60\text{ g/cm}^3$ ,最优含水率 $\omega_{opt}$ 为 $21.7\%$ ,颗粒比重 $G$ 为 $2.67$ ,塑限含水率 $\omega_p$ 为 $26.3\%$ ,液限含水率 $\omega_L$ 为 $70.8\%$ ,塑性指数 $I_p$ 为 $44.5$ ,自由膨胀率为 $59\%$ ,属于弱膨胀土。

### 1.2 试样制备

试验选用直径 $61.8\text{ mm}$ 、高 $50\text{ mm}$ 的标准重塑圆柱样,采用分层击实法<sup>[5]</sup>。步骤如下:1)将土料风干、碾碎、过 $2\text{ mm}$ 筛后测定初始含水率;2)根据目标含水率均匀喷洒定量水并置于密封袋内闷闷;3)待水分充分交换、分布均匀后,取一定质量土置于三瓣模具中,沿高度方向分两层击实,第一层土料

击实后对表面刨毛,再击实第二层土料;4)将击实成形的试样脱模后用保鲜膜包裹,放置 $24\text{ h}$ 以上,使击实过程中产生的超静孔隙水(气)压力充分消散。试样制备及装置如图1所示。



图1 试样制备及装置

Fig.1 Sample preparation and apparatus

## 2 试验方法与试验方案

### 2.1 试验方法

采用巴西劈裂试验对养护完成的膨胀土试样进行抗拉强度测试,其中,采用尖状压块的加载方式,根据相关研究<sup>[12]</sup>可知,该加载方式下破坏面形态符合巴西劈裂试验的基本假定。具体试验步骤如下:将膨胀土试样沿高度方向水平放置,使试样与“V”型钢制垫条相接触形成线荷载,以 $2\text{ mm/min}$ 速率加载直至试验结束<sup>[12]</sup>。巴西劈裂试验的动力装置采用多功能压力试验机(图2),该试验机由加载系统与控制系统两部分组成。加载系统的荷载传感器最大量程为 $10\text{ kN}$ ,精度为 $\pm 0.1\%$ ,位移传感器精度为 $\pm 0.5\%$ 。试验机具有自动采集与处理数据的功能,可实时绘制荷载与轴向位移关系曲线。

土壤基质势表征土壤水的能量,反映土体的持水能力,其对非饱和土的强度产生直接影响。为进一步解析膨胀土劈裂拉伸破坏机理,本文采用滤纸法对试样基质吸力进行量测(图3),具体试验步骤<sup>[18]</sup>如下:取击实后的两个直径为 $61.8\text{ mm}$ 、高为 $25\text{ mm}$ 的相同圆柱样,在两土样中间水平放置烘干后的滤纸(滤纸分3层,中间层直径为 $5.5\text{ cm}$ ,用于测试;上下层直径为 $6\text{ cm}$ 起保护作用),并用胶带密封接缝处。试样放入密封罐置于恒温环境下 $10\text{ d}$ ,待滤纸与试样水分交换平衡,将滤纸迅速取出称重、烘干再称重,计算滤纸含水率,从而根据率定曲线方程获得试样的基质吸力。

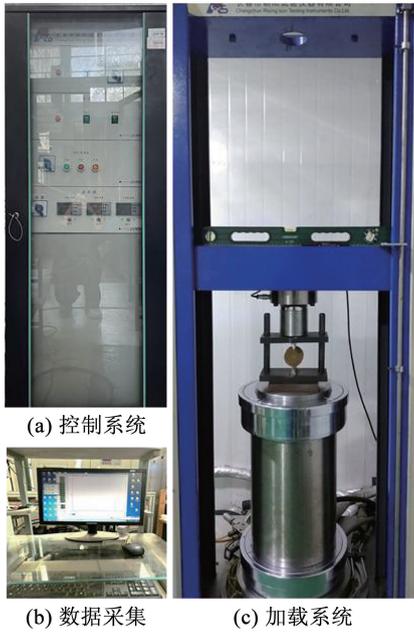


图 2 巴西劈裂试验装置

Fig. 2 Apparatus of Brazilian splitting test (BST)

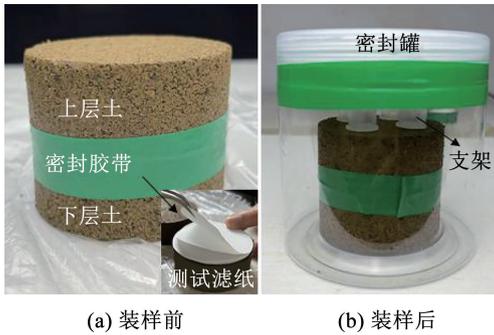


图 3 基质吸力量测装样照片

Fig. 3 Photos of apparatus for measuring matrix suction testing process

## 2.2 试验方案

设计试验方案见表 1,其中含水率为 25.7%,干密度为  $1.6 \text{ g/cm}^3$  的试样理论饱和度已达到 1。为确保试验结果可靠性,各试验工况均设置两个平行试样,当两个试样抗拉强度值的相对误差小于 5% 时取其平均值作为该工况的抗拉强度,否则补做试样<sup>[19]</sup>;基质吸力的量测方案同表 1,各试验工况均设置 3 个平行试样,共计 100 个试样。

表 1 试验方案

Tab. 1 Testing program

| 干密度/ $(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$ | 含水率/%                    | 孔隙比   | 压实度  |
|--------------------------------------|--------------------------|-------|------|
| 1.60                                 | 17.7,19.7,21.7,23.7,25.7 | 0.669 | 1.00 |
| 1.52                                 | 17.7,19.7,21.7,23.7,25.7 | 0.757 | 0.95 |
| 1.44                                 | 17.7,19.7,21.7,23.7,25.7 | 0.854 | 0.90 |
| 1.36                                 | 17.7,19.7,21.7,23.7,25.7 | 0.963 | 0.85 |

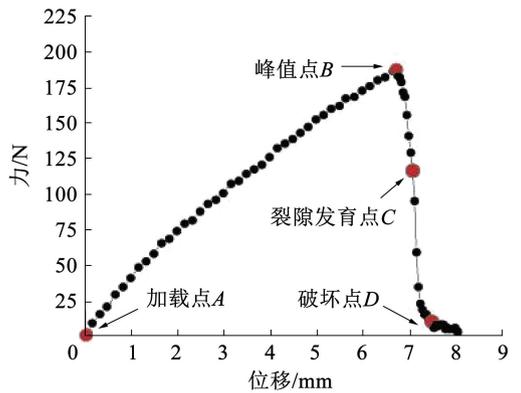
## 3 试验结果与分析

### 3.1 膨胀土巴西劈裂试验适用性探讨

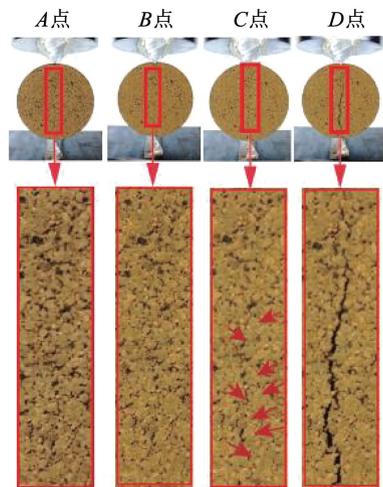
#### 3.1.1 试样破坏过程及最终破坏形态

试验范围内土样均呈现出类似的破坏特征。

图 4 给出了含水率为 17.7%,干密度为  $1.52 \text{ g/cm}^3$  膨胀土试样的劈裂过程及裂隙扩展照片,以此为例,膨胀土在进行巴西劈裂试验时的力 - 位移关系曲线可划分为 3 个阶段:A 点为加载起点,荷载经历近线性的 AB 段,可近似认为试样微小单元内受拉呈线性弹性变形<sup>[20]</sup>,至峰值 B 点,试样表面未出现明显裂隙;在 BC 段荷载迅速下降,C 点处试样出现了肉眼可见的裂缝;CD 段荷载持续跌落,试样裂隙不断发育扩展,直至 D 点后试样完全破坏。图 5 给出了不同试验工况下试样的最终破坏形态。可以看出,破坏后的试样主要沿着加载方向的一条主裂隙贯通,裂隙两侧基本呈对称分布,几乎未出现次生裂隙。但部分试样存在偏斜稍明显的裂缝,这是因为土样本身为颗粒体材料,加载过程中试样内部可能发生沿颗粒边界扩展的多次劈裂。此外,巴西劈裂装置的加载垫条贯入试样的深度很小,加载接触点处塑性变形区也很小,宏观上讲,各工况下膨胀土试样的劈裂破坏形态符合巴西劈裂试验的理想破坏形态。



(a)  $\rho_d=1.52 \text{ g/cm}^3$ ,  $\omega=17.7\%$  试样的径向压力-位移曲线



(b) A、B、C、D 点劈裂裂隙扩展图

图 4 膨胀土典型劈裂裂隙扩展过程

Fig. 4 Typical development of cracks in expansive soil samples

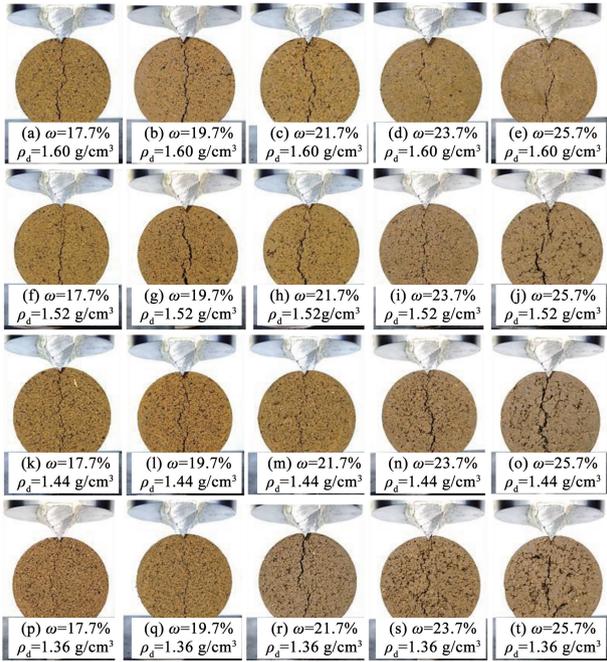


图 5 膨胀土劈裂破坏情况

Fig. 5 Splitting and failure of expansive soil samples

### 3.1.2 脆性指标

巴西劈裂试验最初用于测量岩石等脆性材料的抗拉强度,而膨胀土在一定含水率范围内表现出较强的塑性。鉴于此,对各试验工况下的膨胀土试样的脆性特征进行表征。参考文献[21]建议的脆性指数判别标准,将试验所获的力-位移曲线峰值前的拟合曲线斜率  $k_1$ , 峰值后的拟合曲线斜率  $k_2$  (图 6) 类比得到新的脆性指数:

$$B = 1 - \exp(k_2/k_1) \quad (1)$$

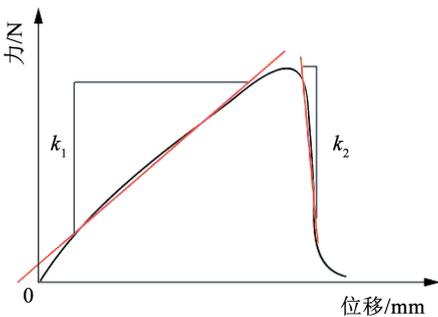
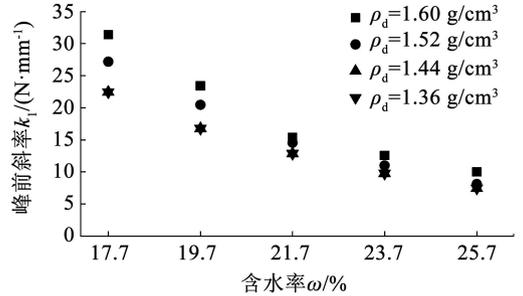


图 6 力-位移曲线斜率拟合示意图

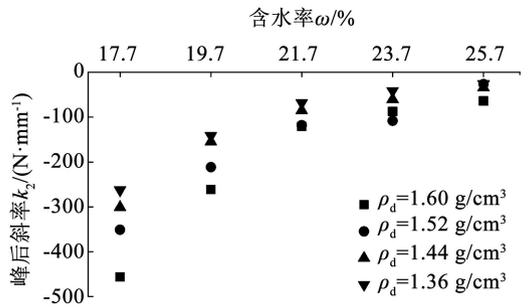
Fig. 6 Slope fitting diagram of pressure-displacement curves

图 7 为 20 组试样峰值前、后拟合曲线斜率的统计信息。力-位移曲线峰值前、后的线性拟合斜率的绝对值呈相同变化趋势,随含水率增加而逐渐减小。图 8 为式 (1) 计算所得的脆性指数。可以看出,含水率越高,不同初始干密度下试样脆性指数差异越大,但总体上,20 组膨胀土试样脆性指数均趋近 1 ( $B > 0.63$ , 即脆性很大),也就是说试样具有较明显的脆性特征。据此可知,巴西劈裂法对重塑膨

胀土抗拉强度测定具有一定适用性。此外,文献[22]对压实黏土进行抗拉强度测试,文献[13]探究高吸力压实膨润土抗拉强度与吸力的关系均采用巴西劈裂试验方法,并取得了较好的效果。由此可见,巴西劈裂方法不仅仅适用于类岩石材料的抗拉强度测试,对于具有脆性破坏特征的重塑土样也值得尝试。因此,在确定巴西劈裂试验的适用条件时,宜以是否具有脆性破坏特征为判定准则,而不应简单以土石分类为判据。



(a) 峰值前



(b) 峰值后

图 7 峰值前、后拟合曲线斜率统计

Fig. 7 Slope statistics of fitted curves before and after peak

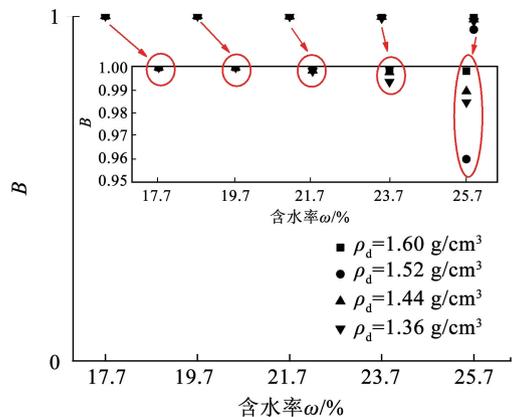


图 8 脆性指数分布图

Fig. 8 Diagram of brittleness index distribution

### 3.1.3 讨论

根据脆性指数与试验劈裂特征初步探讨得出:对含水率在 17.7% ~ 25.7% 之间、干密度在 1.36 ~ 1.6 g/cm³ 之间的重塑膨胀土试样,巴西劈裂试验具

有较好的适用性。但仍存在以下局限性:对间接获取的抗拉强度准确性尚未开展研究分析,有待采用其他拉伸方法进行对比验证;对于试验范围以外如高于塑限等试样的适用性则需重新根据脆性指标、试样破坏形态、加载尖端贯入度等进行综合判定。针对土样这一颗粒材料可能呈现的弧形劈裂面特征,后续可采用声发射仪与 DEM 数值模拟进一步探究试样加载过程中的结构变化特征与裂缝扩展规律。

### 3.2 力-位移曲线

力-位移曲线可清晰地反映出试样加载过程中发生劈裂破坏的力学行为演化特征。相同含水率变干密度、相同干密度变含水率试样组的力-位移曲线具有一定的相似性,分别选取一组为例进行说明。图 9(a)给出了试样初始干密度为  $1.52 \text{ g/cm}^3$ , 含水率分别为 17.7%、19.7%、21.7%、23.7%、25.7% 的径向压力-位移曲线。可以看出,5 组曲线先期呈线性上升趋势,且随含水率升高,径向压力峰值逐渐减小,而峰值对应位移则逐渐增加,这主要是因为较厚的水膜使土颗粒间相对滑动更容易;径向压力达到峰值后,径向压力随位移增大急剧减小,下降速率随含水率增大有所减缓。5 组曲线形态的差异是土样所处不同稠度状态的宏观表现,即液性指数越小土样越坚硬,反之则偏松软。根据液性指数范围(即  $I_L = -1.933 \sim -0.0135$ )也可判断出该试验范围内所用土均属“坚硬土”范畴<sup>[23]</sup>,这从另一个角度证明了巴西劈裂法对试验范围内的膨胀土试样抗拉强度测试是适用的。图 9(b)给出了含水率 19.7% 时,干密度分别为 1.36、1.44、1.52、1.6  $\text{g/cm}^3$  时试样的径向压力-位移曲线。随着干密度的增大,试样的径向压力峰值逐渐增大,其对应位移也逐渐增加,这主要是因为颗粒间嵌固度增大,破坏时需要更大的变形来分离粒间作用;在径向压力达到峰值后,径向压力随位移增加开始骤降,下降速率随干密度减小有所减缓。

### 3.3 抗拉强度

巴西劈裂试验测得的膨胀土试样抗拉强度可以采用式(2)进行计算<sup>[24]</sup>:

$$\sigma_t = \frac{2P_{\max}}{\pi dL} \quad (2)$$

式中: $\sigma_t$ 为抗拉强度,kPa; $P_{\max}$ 为峰值荷载大小,kN; $d$ 为圆柱形试样直径,m; $L$ 为试样高度,m。

#### 3.3.1 含水率的影响

基质吸力的准确测定可为膨胀土强度特性的机理解析提供新的思路。本文采用双圈 No. 203 型滤纸,其基质吸力率定曲线由文献[25]在 1250 型压力膜提取器中率定得到,率定曲线方程可表示为

$$\begin{cases} \lg h_m = -0.0767\omega_{fp} + 5.493, \omega_{fp} \leq 47.7\% \\ \lg h_m = -0.0120\omega_{fp} + 2.470, \omega_{fp} > 47.7\% \end{cases} \quad (3)$$

式中: $h_m$ 为基质吸力值, $\omega_{fp}$ 为滤纸含水率。

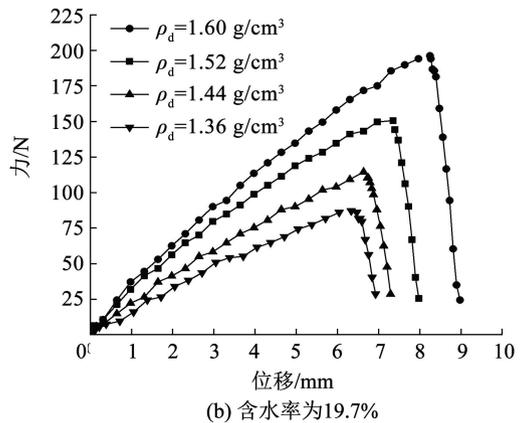
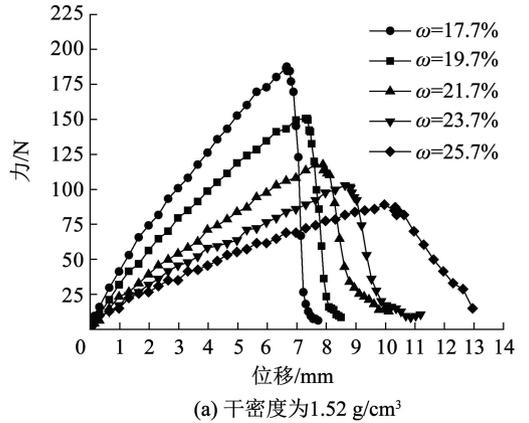


图 9 径向压力-位移曲线

Fig. 9 Radial pressure-displacement curves

图 10 给出了不同初始干密度试样抗拉强度随含水率变化的关系曲线。可以看出,各干密度工况下试样的抗拉强度均随含水率的增大而减小,并且干密度越大,试样抗拉强度随含水率增加而降低的速率越大。例如,干密度为  $1.60 \text{ g/cm}^3$  试样在含水率由 17.7% 升至 25.7% 时,抗拉强度值减小约 27 kPa,而干密度为  $1.36 \text{ g/cm}^3$  试样相应减少约 14 kPa。在含水率同幅度的变化下,高干密度试样抗拉强度增减变幅更明显,这是由于颗粒排列较密,颗粒间、颗粒与孔隙水的宏观作用更显著,影响抗拉强度的敏感度更高。图 10 也给出了试样基质吸力随含水率变化的拟合关系,不难看出,不同初始干密度试样的基质吸力随含水率增大均呈现减小的趋势。

土样发生拉伸破坏,主要是因为土颗粒间丧失联结作用<sup>[26]</sup>。对重塑黏土而言,其联结作用一般源于三部分<sup>[27]</sup>:1)凝聚力,包括结合水膜的物化作用,黏土矿物引起的黏结力和颗粒分子引力等;2)基质吸力,包括短程吸附作用与毛细作用;3)包裹在土

颗粒外部的盐份溶于水产生的胶结作用。相关研究<sup>[28]</sup>表明,压实黏土通常在微观呈现为“双孔隙”结构,其孔隙一般分为集聚体内的小孔隙与集聚体间的大孔隙。由文献<sup>[29]</sup>提出的非饱和土有效饱和度概念模型可知,集聚体间的基质吸力对土样抗拉强度具有贡献,换言之,构成土样抗拉强度的基质吸力主要作用于集聚体间。此外,结合水膜的物化作用引起的凝聚力主要作用于集聚体内部小孔隙,而盐溶液产生的胶结力在双孔隙上均有体现。

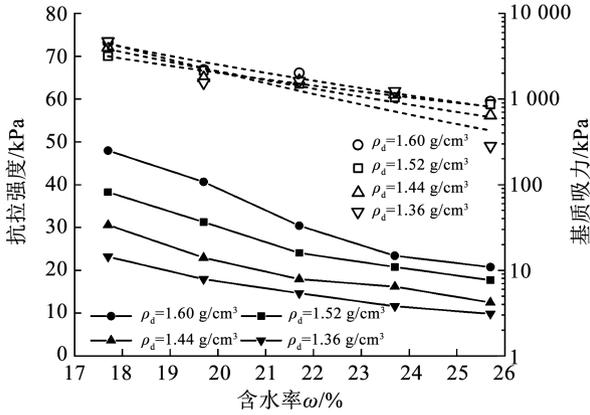


图 10 不同干密度试样基质吸力、抗拉强度与含水率关系  
Fig. 10 Relationship of matrix suction, tensile strength and water content of specimens with different dry densities

基于上述机理,对膨胀土抗拉强度随含水率的变化规律解释如下:同一干密度条件下,随着含水率的增加,集聚体内小孔隙水膜增厚,结合水膜物化作用减弱,黏土矿物间分子引力、黏结力减小,凝聚力降低;同时,随含水率增加,聚集体间毛细水含量增多,基质吸力减小,基质吸力本质是水气界面压力差值,根据 Young-Laplace 方程可知,集聚体间弯液面曲率减小,水气界面压差相应减小<sup>[28]</sup>。此外,水溶液浓度随着含水率的增加而降低,集聚体内外孔隙胶结能力均在一定程度上弱化。因此在该试验范围内,随含水率增大构成土样抗拉强度的 3 种联结作用均发生弱化,宏观表现为抗拉强度减小(图 11)。

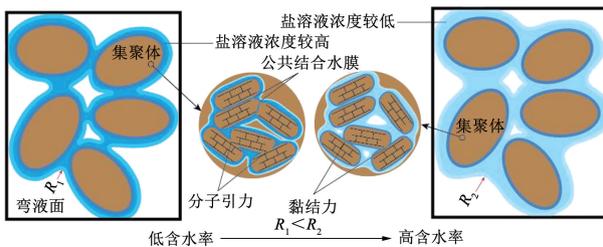


图 11 不同含水率土样微观作用力示意图

Fig. 11 Schematic diagram of microscopic forces of soil samples with different water contents

### 3.3.2 干密度的影响

图 12 为不同含水率工况下试样抗拉强度和基质吸力与干密度的变化关系曲线。可以看出,不同含水率工况下试样的抗拉强度随干密度增大而增加,且含水率越大,试样抗拉强度随干密度增加的增幅减小,如含水率为 17.7% 的试样在干密度由 1.36 g/cm<sup>3</sup> 增至 1.6 g/cm<sup>3</sup> 时,抗拉强度值提高约 24 kPa,而含水率为 25.7% 的试样在这一过程中抗拉强度提高仅约 11 kPa,说明高含水率试样的抗拉强度受干密度影响较小,这是因为土样内大部分孔隙被水体充填,水分润滑条件下颗粒间咬合摩擦作用较小,增加单位体积的土颗粒数量也难以大幅有效地增加接触点与接触力。

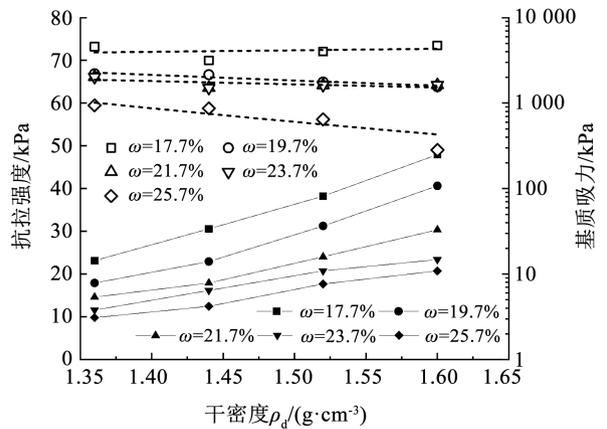


图 12 基质吸力、抗拉强度与初始干密度关系

Fig. 12 Relationship of matrix suction, tensile strength and initial dry density

不同含水率工况下试样抗拉强度随干密度增大而增加。从宏观角度来说,这是由于单元体内土颗粒增多,颗粒间接触点相应增多,摩擦嵌固作用更明显,从而接触力增加,有效地提高了抗拉强度。从微观角度来看,随着干密度的增加,集聚体内间距减小,土粒间双电层<sup>[17]</sup>部分结合,形成公共结合水膜,使得分子力、黏土矿物联结力增强。根据图 12 试样基质吸力随初始干密度变化的规律可以看出,在低吸力区,基质吸力随干密度增大有所减小;在中高吸力区,基质吸力受初始干密度影响较小,类似的试验规律在文献<sup>[30]</sup>中也有所呈现。从上述现象中可以推断,随着试样的干密度增加,试样内部的基质吸力对膨胀土抗拉强度几乎没有贡献甚至起不利作用。这更进一步说明,试样抗拉强度随初始干密度增大的原因并非由基质吸力变化引起,而是由粒间接触点增加、摩擦嵌固作用增大所致。

### 3.3.3 抗拉强度与含水率、干密度定量关系的数学描述

对试验数据进行回归分析,得出式(4)与图 13

所示的试样抗拉强度与干密度和含水率的函数关系,可以看出,膨胀土试样的抗拉强度与干密度和含水率之间的关系可以用一空间曲面方程很好地描述,该方程的建立可以实现不同工况下膨胀土抗拉强度的快速评估。

$$\begin{cases} \sigma_t = a\omega + b \\ a = -7.781\rho_d + 9.026 \\ b = 241.34\rho_d - 279.51 \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $\omega$  为试样含水率;  $\rho_d$  为试样初始干密度,  $\text{g}/\text{cm}^3$ ;  $a$ 、 $b$  为与初始干密度相关的拟合参数。

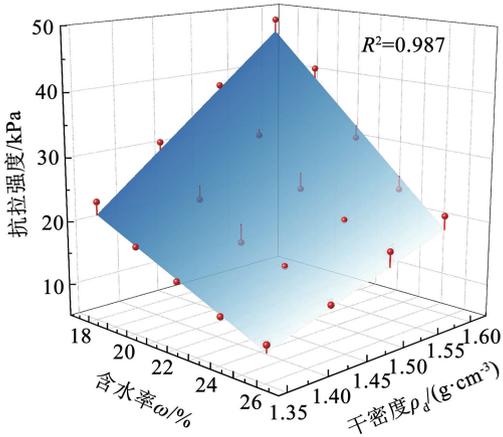


图 13 抗拉强度与初始干密度和含水率的关系

Fig. 13 Relationship of water content, initial dry density and tensile strength

### 3.4 能量特征

试样的破坏过程是能量吸收、耗散与释放的综

合过程<sup>[31-32]</sup>。从能量变化角度对土样应力 - 应变关系进行解释可加深对土样破坏特性的认知,现有研究<sup>[15-16,31-33]</sup>多采用破坏应变能密度作为衡量能量大小的指标。考虑到巴西劈裂试验是间接测量土样抗拉强度的方法,其应力 - 应变曲线不具直接物理意义,因此,本文采用破坏能这一指标来综合表征土样抗破坏能力,其大小由试样力 - 位移曲线自加载点至峰值破坏点的下部包络面积确定<sup>[23-24]</sup>。该指标能够综合表征试样加载后的破坏特性,即破坏能越大,土样破坏前所储存的能量越高,抵抗破坏的能力越强。

图 14 为各含水率下不同初始干密度试样的能量吸收过程线,曲线末端对应的吸收能即为破坏能。可以看出,能量吸收过程线均呈“抛物线”形态:在加载初期,能量随位移增加吸收较慢,呈下凹形态,随位移持续地增加,能量吸收速率不断增长,这是径向压力近线性增长的结果。在含水率为 17.7% ~ 21.7% 时,干密度从 1.36  $\text{g}/\text{cm}^3$  增至 1.6  $\text{g}/\text{cm}^3$ ,试样的破坏能有较大增幅,分别为 0.576、0.612、0.536 J,这说明该含水率区间,试样增大初始干密度可以有效地提高其抗破坏能力。然而,在含水率为 23.7% ~ 25.7% 时,破坏能随干密度的增加其增幅明显减小,分别为 0.348、0.343 J,说明初始干密度对试样抵抗破坏能力的影响减弱。将吸收能割线斜率作为衡量平均吸收能量快慢的指标,可以发现,试样吸收能量的速率随着干密度的增加而显著增大、随含水率的增加而显著减小。

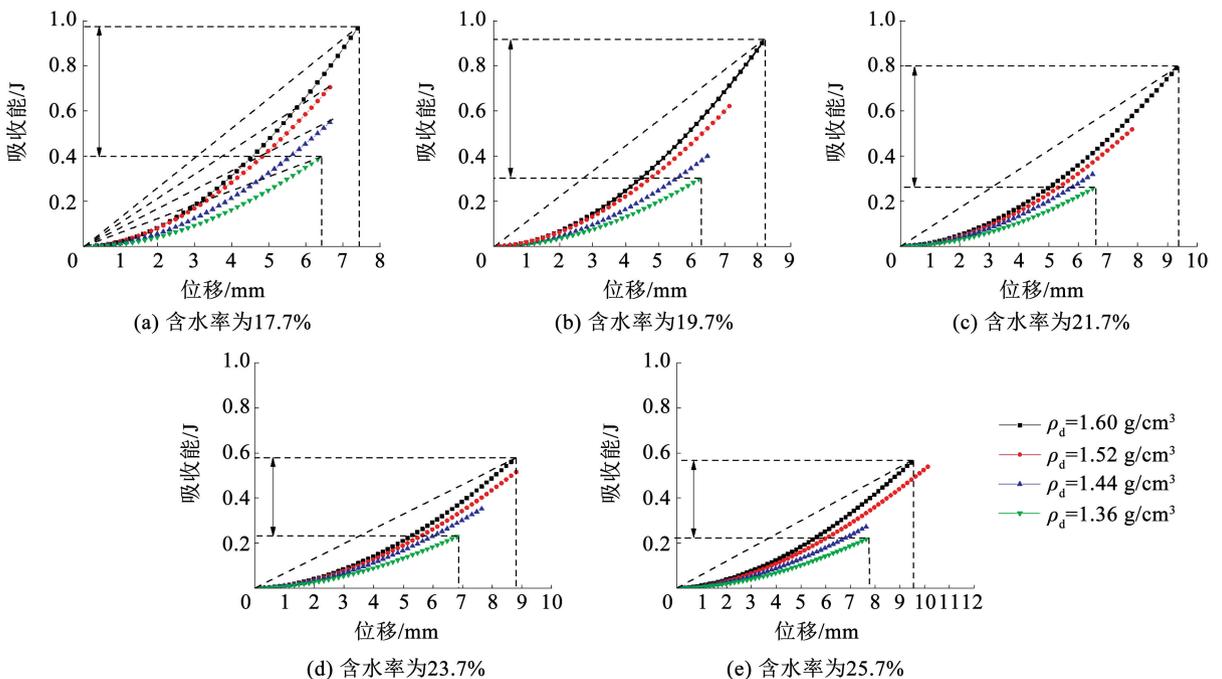


图 14 能量吸收过程线

Fig. 14 Energy absorption process line

进一步地,图 15 给出了不同干密度下膨胀土试样的破坏能随含水率的变化关系。可以看出,试样的破坏能随含水率的增加而减小,但其变化规律与试样抗拉强度随含水率增加而减小的趋势明显不同。由图 10 可知,试样的抗拉强度随含水率的增加近似线性降低;而试样的破坏能随之近似呈现出双线性特征,也即是说,存在一个“临界含水率”使得试样破坏能随含水率增加而降低的速率发生明显的减小。这是因为当试样高于“临界含水率”时,峰值破坏力虽减小,但破坏位移显著增加,使得破坏能趋于稳定或下降缓慢。因此,将“临界含水率”用以表征土样结构力由颗粒嵌固作用主导向孔隙水黏滞作用主导的转折点。且“临界含水率”呈现出随试样

干密度增加而增大的规律,这是因为密实样颗粒间嵌固作用大,在高含水率下才起明显的润滑作用;反之,低密度试样颗粒间接触作用弱,低含水率下水分便具有较强的润滑作用。在工程实践中,仅关注强度大小往往会忽视由变形引起的结构破坏。破坏能的提出可为工程设计提供一定借鉴:如在满足强度要求的前提下应避免高于“临界含水率”的土样或重点关注其破坏变形量;在满足抗拉强度及破坏变形前提下,可根据土体抗破坏能力进行经济比选。综上所述,单以抗拉强度指标作为土体抵抗拉伸破坏能力的判别标准具有局限性,工程中可考虑将能量指标作为一辅助指标对土体抗破坏能力进行更加准确地表征和判断。

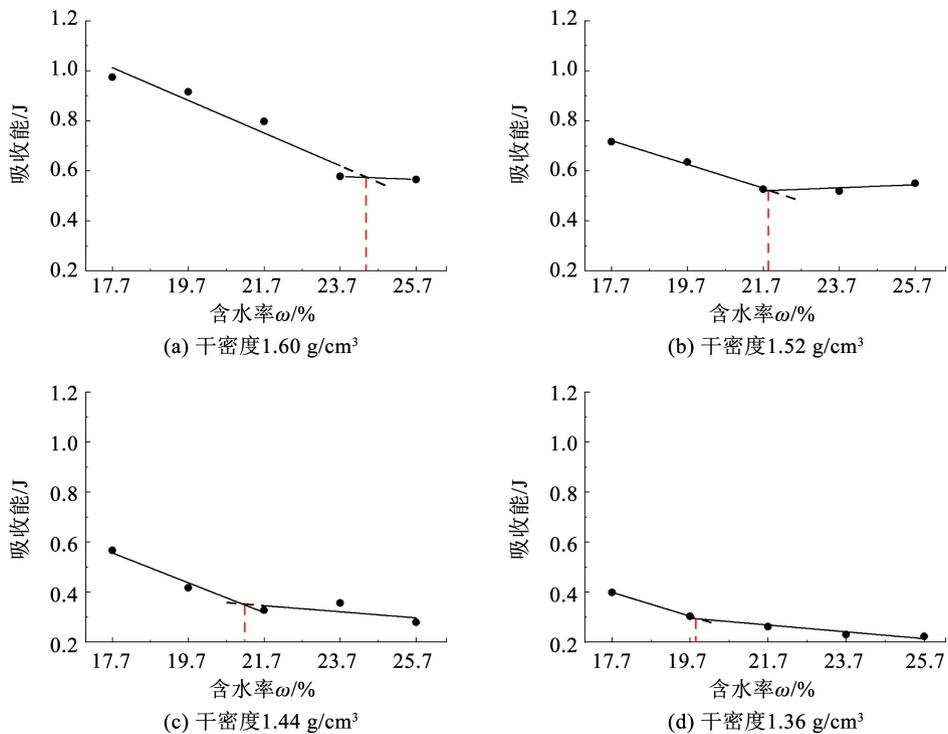


图 15 膨胀土劈裂破坏能与含水率关系曲线

Fig. 15 Relation curve between failure energy and water content

### 4 结 论

本文基于巴西劈裂试验较为系统地探究了含水率和干密度对重塑膨胀土抗拉强度的影响,并提出采用破坏能指标从能量演化角度对其破坏特性进行定量描述的方法,得出以下结论:

1) 通过提出的脆性指数及试样劈裂后的破坏特征可界定巴西劈裂试验对试验范围内的重塑膨胀土具有适用性。

2) 试验范围内的膨胀土具有统一的力学行为。表现为试样加至峰值荷载时,劈裂面未出现明显裂缝;于峰值荷载后,劈裂面出现了可观察到的宏观裂缝。

3) 膨胀土抗拉强度与含水率呈负相关关系,且干密度越大减幅越大;与干密度呈正相关关系,含水率越大增幅越小。

4) 试样破坏能与抗拉强度随初始干密度及含水率具有相似的变化趋势,但存在一“临界含水率”使得破坏能随含水率增加近似呈现出双线性降低趋势,且该“临界含水率”随干密度的增加而增大。

### 参 考 文 献

[1] 曹自印. 中强膨胀土区高速铁路路基浸水试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 19(12): 3467  
 CAO Ziyin. Field soaking tests on the moderate-strong expansive soil ground of the high-speed railway subgrade [J]. Journal of Railway

- Science and Engineering, 2022, 19(12): 3467. DOI:10.19713/j.cnki.43-1423/u.20221293
- [2] 马玉岩, 程丽娟, 巴俊达. 某大型膨胀土深基坑边坡滑坡分析与启示[J]. 地下空间与工程学报, 2022, 18(增刊 1): 480  
MA Yuyan, CHENG Lijuan, BA Junda. Study on landslide of a large expansive soil deep foundation pit[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2022, 18(Sup. 1): 480
- [3] 刘斯宏, 鲁洋, 张勇敢, 等. 袋装膨胀土组合体渗透特性大型模型试验[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50(6): 101  
LIU Sihong, LU Yang, ZHANG Yonggan, et al. Large-scale model test on permeability characteristics of soilbags infilled with expansive soils[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2022, 50(6): 101
- [4] 朱崇辉, 刘俊民, 严宝文, 等. 非饱和黏性土的抗拉强度与抗剪强度关系试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008(增刊 2): 3453  
ZHU Chonghui, LIU Junmin, YAN Baowen, et al. Experimental study on relationship between tensile and shear strength of unsaturation clay earth material[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008(Sup. 2): 3453
- [5] 李昊达, 唐朝生, 徐其良, 等. 土体抗拉强度试验研究方法的进展[J]. 岩土力学, 2016, 37(增刊 2): 175  
LI Haoda, TANG Chaosheng, XU Qiliang, et al. Advances in experimental testing methods of soil tensile strength[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(Sup. 2): 175
- [6] 贺琦, 陈世万, 杨福波, 等. 不同温度条件下北山花岗岩巴西劈裂试验裂隙扩展过程研究[J/OL]. 长江科学院院报; 1-12 [2023-03-15]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1171.TV.20220321.1243.004.html>  
HE Qi, CHEN Shiwan, YANG Fubo, et al. Evolution of cracking for Brazilian splitting test of Beishan granite under different temperatures[J/OL]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute; 1-12 [2023-03-15]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1171.TV.20220321.1243.004.html>
- [7] 沙鹏, 杨丹莲, 邬一鑫, 等. 花岗岩巴西劈裂渐进破坏特征与能量演化研究[J]. 工程地质学报, 2021, 29(5): 1258  
SHA Peng, YANG Danlian, WU Yixin, et al. progressive failure characteristics and energy evolution of granite in brazilian disc test[J]. Journal of Engineering Geology, 2021, 29(5): 1258
- [8] 甘一雄, 吴顺川, 任义, 等. 基于声发射上升时间/振幅与平均频率值的花岗岩劈裂破坏评价指标研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(7): 2324  
GAN Yixiong, WU Shunchuan, REN Yi, et al. Evaluation indexes of granite splitting failure based on RA and AF of AE parameters[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(7): 2324
- [9] 李春, 胡耀青, 张纯旺, 等. 不同温度循环冷却作用后花岗岩巴西劈裂特征及其物理力学特性演化规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(9): 1797  
LI Chun, HU Yaoqing, ZHANG Chunwang, et al. Brazilian split characteristics and mechanical property evolution of granite after cyclic cooling at different temperatures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(9): 1797
- [10] 王辉, 李勇, 曹树刚, 等. 含预制裂隙黑色页岩裂纹扩展过程及宏观破坏模式巴西劈裂试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(5): 912  
WANG Hui, LI Yong, CAO Shugang, et al. Brazilian splitting test study on crack propagation process and macroscopic failure mode of pre-cracked black shale[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(5): 912
- [11] ZHOU G, HU K, ZHAO X, et al. Laboratory investigation on tensile strength characteristics of warm frozen soils[J]. Cold Regions Science and Technology, 2015, 113: 81
- [12] 张勇敢, 鲁洋, 刘斯宏, 等. 基于巴西劈裂试验的冻结膨胀土拉伸特性研究[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(11): 2046  
ZHANG Yonggan, LU Yang, LIU Sihong, et al. Experimental study on tensile strength of frozen expansive soils based on Brazilian splitting tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(11): 2046
- [13] 张俊然, 王偃锦, 姜彤, 等. 基于 PIV 技术的高吸力下压实膨润土径向劈裂试验研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2021, 29(3): 691  
ZHANG Junran, WANG Lijin, JIANG Tong, et al. Diametric splitting tests on compacted bentonite at different high suctions based on PIV technique[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2021, 29(3): 691
- [14] 栗晓林, 王红坚, 邹少军, 等. 动荷载作用下冻结黏土破坏特性试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2019, 50(3): 641  
LI Xiaolin, WANG Hongjian, ZOU Shaojun, et al. Experimental study on failure properties of frozen clay under dynamic loading[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2019, 50(3): 641
- [15] 杜海民, 马巍, 张淑娟, 等. 围压与含水率对冻结砂土破坏应变能密度影响特性研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(7): 1943  
DU Haimin, MA Wei, ZHANG Shujuan, et al. Effects of confining pressure and water content on failure strain energy density for frozen silty sands[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(7): 1943
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for geotechnical testing method: GB/T 50123—2019[S]. Beijing: China Planning Press, 2019
- [17] 蔺建国, 叶加兵, 邹维列. 孔隙溶液对膨胀土微观结构的影响[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2020, 48(4): 12  
LIN Jianguo, YE Jiabing, ZOU Weilie. Effect of pore fluid on microstructure in expansive soil[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2020, 48(4): 12
- [18] 白福青, 刘斯宏, 袁骄. 滤纸法测定南阳中膨胀土土水特征曲线试验研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(6): 928  
BAI Fuqing, LIU Sihong, YUAN Jiao, et al. Measurement of SWCC of Nanyang expansive soil using the filter paper method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(6): 928
- [19] WANG S, LV Q, BAAJ H, et al. Volume change behaviour and microstructure of stabilized loess under cyclic freeze-thaw conditions[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2016, 43(10): 865
- [20] 宫凤强, 李夕兵. 巴西圆盘劈裂试验中拉伸模量的解析算法[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(5): 881  
GONG Fengqiang, LI Xibing. Analytical algorithm to estimate tensile modulus in Brazilian disk splitting tests[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(5): 881
- [21] 刘恩龙, 沈珠江. 岩土材料的脆性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005(19): 51  
LIU Enlong, SHEN Zhujiang. Study on brittleness of geomaterials[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005(19): 51

- [22] AKIN I D, LIKOS W J. Brazilian tensile strength testing of compacted clay[J]. *Geotechnical Testing Journal*, 2017, 40(4): 608
- [23] 胡磊, 张云, 史卜涛, 等. 重塑黏土抗拉特性试验研究[J]. *水文地质工程地质*, 2017, 44(4): 98  
HU Lei, ZHANG Yun, SHI Butao, et al. Test research on the tensile properties of remoulded clay [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2017, 44(4): 98
- [24] 王成, 王春, 苏承东, 等. 不同加载速率对石灰岩巴西劈裂特性的影响[J]. *采矿与安全工程学报*, 2021, 38(5): 1036  
WANG Cheng, WANG Chun, SU Chengdong, et al. Effects of different loading rates on Brazilian tension characteristics of limestone[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2021, 38(5): 1036
- [25] 王钊, 杨金鑫, 况娟娟, 等. 滤纸法在现场基质吸力量测中的应用[J]. *岩土工程学报*, 2003, 25(4): 405  
WANG Zhao, YANG Jinxin, KUANG Juanjuan, et al. Application of filter paper method in field measurement of matric suction[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2003, 25(4): 405
- [26] 汤连生, 桑海涛, 侯涛, 等. 花岗岩残积土抗拉强度试验研究[J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 2014, 53(6): 98  
TANG Liansheng, SANG Haitao, HOU Tao, et al. Experimental study on tensile strength of granite residual soil [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2014, 53(6): 98
- [27] 吕海波, 曾召田, 葛若东, 等. 胀缩性土抗拉强度试验研究[J]. *岩土力学*, 2013, 34(3): 615  
LÜ Hailbo, ZENG Zhaotian, GE Ruodong, et al. Experimental study of tensile strength of swell-shrink soils[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34(3): 615
- [28] DIAMOND S. Microstructure and pore structure of impact compacted clays[J]. *Clays and Clay Minerals*, 1971, 19: 239
- [29] ALONSO E E, PINYOL N M, GENS A. Compacted soil behaviour: initial state, structure and constitutive modelling[J]. *Géotechnique*, 2013, 63(6): 463
- [30] ROMERO E, GENS A, LLORET A. Water permeability, water retention and microstructure of unsaturated compacted boom clay [J]. *Engineering Geology*, 1999, 54(1/2): 117
- [31] 谢和平, 彭瑞东, 鞠杨. 岩石变形破坏过程中的能量耗散分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004(21): 3565  
XIE Heping, PENG Ruidong, JU Yang. Energy dissipation of rock deformation and fracture[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004(21): 3565
- [32] GONG F, LUO S, YAN J. Energy storage and dissipation evolution process and characteristics of marble in three tension-type failure tests[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2018, 51(11): 3613
- [33] 孙倩, 李树忱, 冯现大, 等. 基于应变能密度理论的岩石破裂数值模拟方法研究[J]. *岩土力学*, 2011, 32(5): 1575  
SUN Qian, LI Shuchen, FENG Xianda, et al. Study of numerical simulation method of rock fracture based on strain energy density theory[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(5): 1575

(编辑 魏希柱)

(上接第 124 页)

- [11] DEGROOT M H, SCHERVISH M J. Probability and statistics [M]. Englewood Cliff: Pearson Higher Isia Education, 2010
- [12] ROSENBLATT M. Remarks on some non-parametric estimates of a density function[J]. *Annals of Mathematical Statistics*, 1956, 27(3): 832
- [13] 董俊, 曾永平, 单德山. 核密度估计的桥梁结构地震易损性分析[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2018, 50(3): 109  
DONG Jun, ZENG Yongping, SHAN Deshan. Seismic fragility analysis of railway bridge using kernel density estimation [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2018, 50(3): 109
- [14] WAND M, JONES M C. Kernel smoothing [M]. Calabas: Chapman and Hall, 1994
- [15] 董俊. 铁路高墩大跨刚构-连续组合体系桥梁近场地震易损性分析研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2016  
DONG Jun. Fragility analysis of railway long span rigid frame-continuous combination system bridge with high pier subjected to near-fault ground motion [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016
- [16] 崔靛波. 高烈度地区铁路简支梁桥隔震研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2016  
CUI Jingbo. Study on seismic isolation of railway simple supported beam bridge in high seismic intensity region [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2016
- [17] 董俊, 陈克坚, 曾永平, 等. 高烈度地震区铁路 32 m 预应力混凝土简支梁摩擦摆支座减震性能研究[J]. *铁道标准设计*, 2020, 64(增刊 1): 63  
DONG Jun, CHEN Kejian, ZENG Yongping, et al. Study on vibration mitigation property of railway 32 m prestressed concrete simply-supported girder with friction pendulum bearings in highly seismic area[J]. *Railway Standard Design*, 2020, 64(Sup. 1): 63
- [18] 董俊, 单德山, 张二华, 等. 非规则连续刚构桥地震易损性分析[J]. *西南交通大学学报*, 2015, 50(5): 845  
DONG Jun, SHAN Deshan, ZHANG Erhua, et al. Seismic fragility of irregular continuous rigid frame bridge[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2015, 50(5): 845
- [19] 吴文朋. 考虑不确定性的钢筋混凝土桥梁地震易损性研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2016  
WU Wenpeng. Seismic fragility of reinforced concrete bridges with consideration of various sources of uncertainty [D]. Changsha: Hunan University, 2016
- [20] 国家铁路局. 铁路桥涵地基和基础设计规范: TB 10093—2017 [S]. 北京: 中国铁道出版社, 2017  
National Railway Administration. Code for design on subsoil and foundation of railway bridge and culvert: TB 10093—2017 [S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2017

(编辑 魏希柱)