



重塑黏土抗拉强度试验研究与验证

白帅鑫, 尹超, 孟维庆, 王帅伟, 郑永香, 王伟

Experimental study and verification on tensile strength of remolded clay

BAI Shuaixin, YIN Chao, MENG Weiqing, WANG Shuaiwei, ZHENG Yongxiang, and WANG Wei

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202305051>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

水泥改良土的拉伸强度特性及其计算方法

Tensile strength characteristics and calculation methods of the cement stabilized soil

魏洪山, 王伟志, 徐永福, 白宇帆, 严祯强, 王浩 水文地质工程地质. 2022, 49(6): 81–89

基于动态残余强度的不同含水率条件下滑坡稳定性研究

Research on landslide stability under different water content conditions based on the dynamic residual strength

魏占玺, 谢东武, 毋远召, 马文礼, 李元, 李万花 水文地质工程地质. 2022, 49(2): 126–136

渠坡非饱和膨胀土含水率与强度关系试验研究

An experimental study of the relationship between water content and strength of unsaturated expansive soil on canal slope

李斌, 郝继峰, 鞠远江, 宋博, 章博, 罗小斌, 王泽智, 吕宁 水文地质工程地质. 2022, 49(5): 129–136

云母影响水泥软黏土强度的试验研究

Experimental research on the influence of mica on strength of cement-reinforced soft clay

张亚玲, 赵晓彦, 严群 水文地质工程地质. 2021, 48(4): 101–108

火烧迹地土壤根系特征及其对抗剪强度的影响

Root characteristics and its influences on shear strength in burned areas

胡卸文, 侯羿腾, 王严, 杨瀛 水文地质工程地质. 2019, 46(5): 106–112

典型黄土滑坡滑带土不同含水率下蠕变特性试验研究

An experimental study of the creep characteristics of loess landslide sliding zone soil with different water content

王新刚, 刘凯, 王友林, 张培栋, 石卫, 罗力 水文地质工程地质. 2022, 49(5): 137–143



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: [10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202305051](https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202305051)

白帅鑫, 尹超, 孟维庆, 等. 重塑黏土抗拉强度试验研究与验证 [J]. 水文地质工程地质, 2024, 51(5): 87-94.
BAI Shuaixin, YIN Chao, MENG Weiqing, et al. Experimental study and verification on tensile strength of remolded clay[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2024, 51(5): 87-94.

重塑黏土抗拉强度试验研究与验证

白帅鑫¹, 尹超^{1,2}, 孟维庆¹, 王帅伟³, 郑永香^{1,2}, 王伟^{1,2}

(1. 石家庄铁道大学土木工程学院, 河北 石家庄 050043; 2. 石家庄铁道大学道路与铁道工程
安全保障省部共建教育部重点实验室, 河北 石家庄 050043; 3. 中国地质科学院水文地质
环境地质研究所自然资源部地下水科学与工程重点实验室, 河北 石家庄 050061)

摘要: 黏土的抗拉强度是决定土质边坡稳定的重要因素之一。由于土体的碎散性, 使得黏土抗拉强度的研究一直进展较为缓慢。基于自行设计研发的直接拉伸试验装置对重塑黏土进行单轴拉伸试验, 开展含水率和拉伸速率对重塑黏土抗拉强度影响规律的研究, 并使用离散元方法对试验结果进行了验证。试验结果表明: (1)当拉伸速率等其他条件不变时, 随着含水率的增加, 重塑黏土的抗拉强度呈现出先增大再减小的趋势, 峰值抗拉强度出现在最优含水率附近; (2)当含水率等其他条件不变时, 随着拉伸速率的增加, 重塑黏土的抗拉强度逐渐增大; (3)在试验含水率范围(18%~24%)内, 重塑黏土在试验过程中发生塑性变形, 并在达到峰值拉伸强度后表现出软化的破坏规律; (4)使用离散元模拟方法对上述试验得到的结果进行对比分析, 重塑黏土的抗拉强度变化与试验结果一致, 验证了本文方法的正确性。研究成果可用于土质边坡的稳定性分析以及边坡防护的计算和设计。

关键词: 重塑黏土; 单轴拉伸试验; 抗拉强度; 含水率; 拉伸速率; 离散元

中图分类号: TU442

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2024)05-0087-08

Experimental study and verification on tensile strength of remolded clay

BAI Shuaixin¹, YIN Chao^{1,2}, MENG Weiqing¹, WANG Shuaiwei³, ZHENG Yongxiang^{1,2}, WANG Wei^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang, Hebei 050043, China;

2. Key Laboratory of Ministry of Education of Roads and Railway Engineering Safety Control, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang, Hebei 050043, China; 3. Key Laboratory of Groundwater Sciences and Engineering, Ministry of Natural Resources, Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Shijiazhuang, Hebei 050061, China)

Abstract: The tensile strength of clay is an important factor in determining the stability of soil slope. Due to the fragmentation of soil, the understanding of the tensile strength of clay is not clear. In this study, the uniaxial tensile test of remolded clay is carried out to analyze the influence of water content and tensile rate on the tensile strength of remolded clay based on the self-designed direct tensile test device. The test results show that: (1) The tensile strength of remolded clay increases first and then decreases with the increase of water content, as the other

收稿日期: 2023-05-29; 修訂日期: 2023-07-18

投稿网址: www.swdzgcdz.com

基金项目: 河北省自然科学基金(E2021210072; E2021210036; D2021504034); 土木工程学院自主课题(TMHN2209; TMHN2206)

第一作者: 白帅鑫(1999—), 男, 硕士研究生, 主要从事土体强度相关研究。E-mail: 1202101001@student.stdu.edu.cn

通讯作者: 尹超(1989—), 男, 博士, 讲师, 硕士生导师, 主要从事土体强度相关研究。E-mail: robinyc@stdu.edu.cn

conditions (such as tensile rate) remain stable. The peak tensile strength occurs near the optimal water content.

(2) The tensile strength of remolded clay increases with the increase of tensile rate, as other conditions such as water content remain unchanged. (3) In the water content range (18%–24%) of this study, the remolded clay undergoes plastic deformation under uniaxial tension, and shows softening failure law after reaching the peak tensile strength. (4) The discrete element simulation method is used to analyze and verify the results obtained from the above experiments. The results of this study can be used for the stability analysis of soil slope and the calculation and design of slope protection.

Keywords: remolded clay; uniaxial tensile test; tensile strength; water content; tensile rate; discrete element

由于土体的抗拉强度相对较弱,研究人员在实际工程和研究中常常忽略其影响。但是,许多自然灾害的发生与土的抗拉强度密切相关:在我国,约50%的大型灾害性滑坡由强降雨引起,降雨导致边坡土体含水率增加,抗拉强度减小,边坡后壁出现典型的张拉裂隙^[1–3];在西南、西北等地震频发区域,边坡体后缘在地震力的往复作用下极易发生张拉破坏,从而引起大规模的失稳垮塌^[4–6]。另外,公路路堤属于线性工程,在降雨、冻融等自然因素和车辆振动等扰动因素共同作用下,路堤坡面也常常发生张拉开裂^[7–8]。因此,准确测定土体的抗拉强度并研究其变化规律十分重要。

土体抗拉强度的研究始于20世纪50年代,根据施加作用的方式,抗拉强度试验分为间接试验和直接试验^[9]。常见的间接试验方法包括土梁弯曲试验^[10–12]、轴向压裂试验^[13–14]、径向压裂试验^[15–18]等。间接试验的优点在于方法简单、操作容易,但测得的结果比实际抗拉强度偏大^[19]。直接试验通过对土样直接施加拉力,直至试样破坏从而量测得到土体的抗拉强度。国内外学者对土的直接拉伸试验进行了大量的研究。张辉等^[20]设计了一套能测定土体抗拉强度的试验夹具,研究了含水率对黏性土抗拉强度的影响;Lu等^[21]研制了一种试验仪器,可以直接测定土体的抗拉强度,研究了含水率对非饱和砂土抗拉强度的影响;Tamrakar等^[22]通过设计“8”字形截面夹具对土样进行拉伸试验,研究了压实度和拉伸速率对土体抗拉强度的影响;李建等^[23]对纤维加筋土开展拉伸试验,研究了不同纤维掺量和含水率对纤维加筋土抗拉强度的影响;路立娜等^[24]改进了试验装置和模具,研究了分散性黄土抗拉强度随含水率和压实度的变化规律;张绪涛等^[25]通过卧式拉伸试验装置,研究了黏土抗拉强度随含水率的变化规律;张云等^[26]、崔猛等^[27]、胡磊等^[28]研究了黏土抗拉强度与含水率、压实度等影响因素的变化规律;蔡国庆等^[29]采用自制的卧式试验仪器开展试验研究,探究了含水率对非饱和砂土抗拉强度的影

响规律;李梓月^[30]使用立式直接拉伸试验装置,采用胶水固定试样的方式对土样进行固定,研究了含水率和拉伸速率对土体抗拉强度的影响;张国华^[31]通过对直剪设备改进得到卧式试验装置,考虑了含水率对压实膨胀土的抗拉强度影响;魏洪山等^[32]对水泥改良土进行了直接拉伸试验,研究了不同含水率和干密度对水泥改良土抗拉强度的影响。基于上述分析,依据试样在试验装置中的放置方式,可分为卧式试验装置和立式试验装置2种。对于卧式试验装置,其优点为试样易成型,试验易开展。但在试验过程中,试样在受到水平方向拉力作用的同时,还受到垂直方向重力的影响,因此试样在试验过程中会在土样自重影响下产生部分剪切力,而不再是单轴拉伸应力状态。对于立式试验装置,其优点为试样在试验过程中承受的拉力和自重始终处于垂直方向,因此可实现单轴拉伸应力状态,但试样不宜加工成型、试验结果易受到土样自重影响。

本文研制了立式直接拉伸试验装置以及相应试验模具对重塑黏土开展单轴拉伸试验,研究了拉伸速率和含水率对重塑黏土抗拉强度的影响规律,并通过离散元模拟方法对试验结果进行了相应的验证。

1 试验装置的研发与试验开展

1.1 试验装置与试样模具的研发

目前应用较多的试样模具包括规则试样及“8”字形试样。对于长方形或圆柱形等规则的试样,试样一般靠夹具或强力胶粘结等来提供约束,约束过大会出现应力集中的问题,试样会在两端发生破坏;而约束过小会出现试样脱落的现象,导致试验失败。对于“8”字形的试样,模具内部对土体存在一定的约束作用,使测得的土体抗拉强度存在一定的误差。因此,针对前人所使用试样模具的弊端,本文设计了一套新型试样模具。该模具主要由活动板和套筒组成,制样方便简单。制作的土样“两端粗、中间细”,以减少应

力集中现象的发生,使试样不易在两端发生破坏,更易在中间发生破坏。两端采用套筒进行约束,使试样在试验中不会出现脱落的现象。该模具的缺陷在于只适用于黏结力较强的土,对于黏结力较弱的土不易成型、脱模。

本文研制的立式直接拉伸试验装置主要由拉力加载装置、反力框架、固定卡扣、拉力传感器和位移传感器等部件组成,外接传感器接收装置。本试验所用试验装置及试样模具如图1所示。

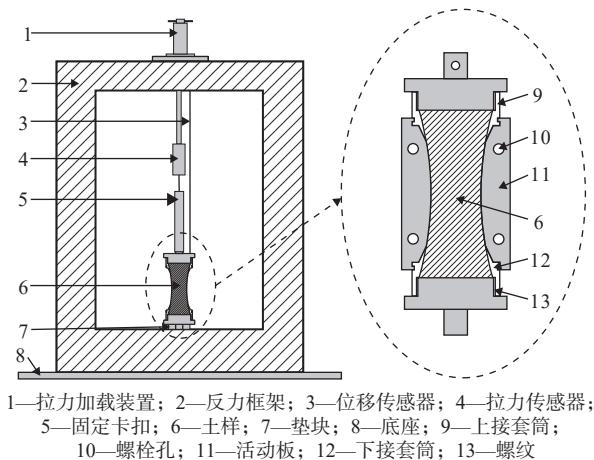


图1 单轴拉伸试验装置与试样模具

Fig. 1 Uniaxial tensile test device and the sample mold

1.2 重塑黏土的单轴拉伸试验

(1) 试验材料

本文试验所用的黏土来自黄骅港深基坑原状土,基坑深度15 m。依据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)^[33],对该重塑黏土进行基本试验得到的基本参数指标如表1所示,级配曲线如图2所示。

表1 重塑黏土基本参数

Table 1 Basic parameters of the remolded clay

参数	土粒相对密度	最大干密度/(g·cm ⁻³)	最优含水率/%	塑限/%	液限/%	塑性指数
取值	2.76	1.73	19	18.49	35.48	16.99

(2) 试验方案

含水率的选择:通过测得的重塑黏土基本参数,该重塑黏土的最优含水率为19%,因此含水率选在最优含水率附近,分别为18%、19%、20%、21%、22%、24%。

拉伸速率的选择:针对本文研制的试验装置,在确定试验方案之前进行了不同拉伸速率的试做,首先使用0.9, 1.8, 2.7, 3.6, 5.4, 7.2, 10.8, 14.4 mm/min进行试验。最终发现,当拉伸速率在3.6 mm/min以下时,土体的破坏时间相对较长,而拉伸速率在10.8 mm/min

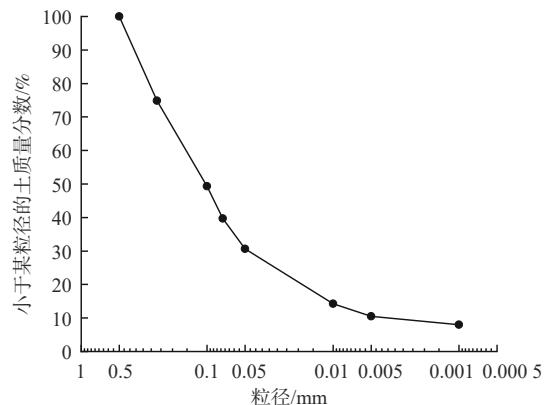


图2 重塑黏土的级配曲线

Fig. 2 Gradation curve of the remolded clay

以上时则破坏发生相对过快。因此,最终确定的拉伸速率为3.6, 5.4, 7.2, 10.8 mm/min。具体试验方案如表2所示。

表2 试验方案

Table 2 Test schemes

组数	拉伸速率/(mm·min ⁻¹)	含水率/%
1	10.8	18
2	10.8	19
3	10.8	20
4	10.8	21
5	10.8	22
6	10.8	24
7	7.2	20
8	5.4	20
9	3.6	20

(3) 试验数据处理

为了消除土样自重对试验结果的影响,土样的应力由下式计算得到:

$$\sigma = \frac{F - mg}{A_0}$$

式中: σ —土样的应力/kPa;

F —轴向拉力/kN;

m —断裂面上部土样及上接套筒的质量/kg;

g —重力加速度/(m·s⁻²);

A_0 —土样断裂面的横截面积/m²。

将位移数据除以土样的原始长度得到土样的应变,即可绘制出土样的应力-应变曲线。

2 试验结果

2.1 不同含水率的试验结果

不同含水率下重塑黏土单轴拉伸试验得到的试验结果如表3所示,应力-应变曲线如图3所示。

表 3 同一拉伸速率下不同含水率重塑黏土的单轴拉伸试验结果

Table 3 Uniaxial tensile test results of the remolded clay with different water contents at the same tensile rate

拉伸速率/ (mm·min ⁻¹)	含水率/%	抗拉强度/kPa	峰值拉应变/%
10.8	18	11.18	0.59
10.8	19	13.64	0.75
10.8	20	13.20	0.92
10.8	21	12.64	0.97
10.8	22	12.14	1.02
10.8	24	11.08	1.14

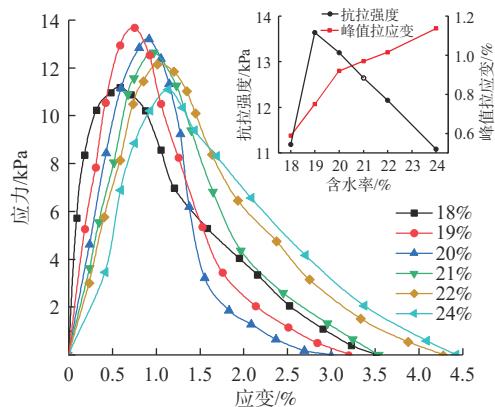


图 3 不同含水率重塑黏土的应力-应变曲线

Fig. 3 Stress-strain curves of the remolded clay with different water contents

图 3 表明,当拉伸速率等其他条件不变时,含水率从 18% 增加到 19%,重塑黏土的抗拉强度由 11.18 kPa 增大到了 13.64 kPa,抗拉强度增大了 22.0%,重塑黏土的峰值拉应变从 0.59% 增大到了 0.75%;含水率从 19% 增加到 24%,重塑黏土的抗拉强度从 13.64 kPa 减小到了 11.08 kPa,抗拉强度减小了 18.8%,重塑黏土的峰值拉应变从 0.75% 增大到了 1.14%,这说明对于重塑黏土来说,当含水率增加时,其抗拉强度呈现出先增大再减小的趋势,峰值强度在最优含水率附近;其峰值拉应变逐渐增大;其应力-应变曲线中峰前应力的斜率不断降低。

2.2 不同拉伸速率的试验结果

不同拉伸速率下重塑黏土的单轴拉伸试验得到的试验结果如表 4 所示,应力-应变曲线如图 4 所示。

图 4 表明,当含水率等其他条件不变时,试验的拉伸速率从 3.6 mm/min 增加到 10.8 mm/min,重塑黏土的抗拉强度从 10.06 kPa 增大到了 13.20 kPa,抗拉强度增大了 31.2%,重塑黏土的峰值拉应变从 1.03% 减小到了 0.92%。因此,重塑黏土的抗拉强度随着拉伸速率的增加而逐渐增大,峰值拉应变随着拉伸速率的增

表 4 20% 含水率下不同拉伸速率重塑黏土的单轴拉伸试验结果

Table 4 Uniaxial tensile test results of the remolded clay with different tensile rates when the water content is 20%

含水率/%	拉伸速率/ (mm·min ⁻¹)	抗拉强度/kPa	峰值拉应变/%
20	3.6	10.06	1.03
20	5.4	11.24	0.99
20	7.2	12.55	0.96
20	10.8	13.20	0.92

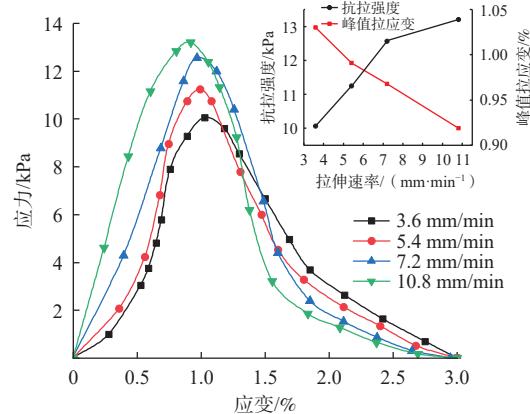


图 4 不同拉伸速率下重塑黏土的应力-应变曲线

Fig. 4 Stress-strain curves of the remolded clay at different tensile rates

加而逐渐减小。

3 分析与讨论

3.1 应力-应变曲线分析

图 5 为含水率 20% 的试样在 10.8 mm/min 拉伸速率下的应力-应变曲线。从图 5 中可以看到:O 点为试验起始点,此时试样无裂缝破坏;OA 段为拉应力不断增大的过程,在此过程中试样不断被拉伸,土颗粒间部分黏结失效;A 点试样达到峰值强度,此时试样中间

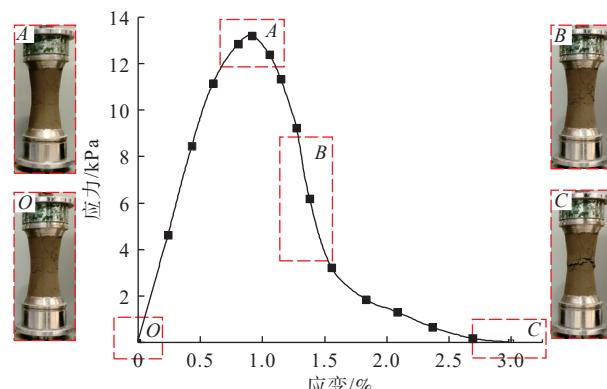


图 5 重塑黏土的应力-应变曲线与破坏过程

Fig. 5 Stress-strain curve and failure process of the remolded clay

部分出现微小裂缝; AC 段为试样的破坏阶段, 试样裂缝逐渐增大, 具有一定的软化特征, 此时, 随着试样应变的逐渐增大, 其应力逐渐减小; C 点试样完全破坏, 此时试样的抗拉强度完全丧失, 中间出现一条贯穿的主裂缝。

3.2 含水率对重塑黏土抗拉强度影响分析

当土体的干密度保持不变时, 土中含水率的增加可分为 3 个阶段。第 1 阶段是结合水膜的形成阶段, 当重塑黏土含水率很低时, 由于土颗粒带负电荷, 吸附水中的阳离子使其成为强结合水, 相邻土颗粒之间形成公共结合水膜, 这一过程中结合水的联结作用加强了重塑黏土的凝聚力, 土的结构具有絮凝结构的特征, 此时随着含水率的增加, 重塑黏土的抗拉强度逐渐增大, 峰值拉应变逐渐增大。第 2 阶段为结合水膜发育形成弱结合水阶段, 随着重塑黏土中的含水率逐渐增加, 土颗粒周围吸附的水膜逐渐变厚, 进而生成了弱结合水, 弱结合水呈黏滞状态, 不会由于水自重而流动, 结合水的联结作用减弱, 重塑黏土的凝聚力减弱, 土体具有分散结构的特征, 此时随着含水率的增加, 重塑黏土的抗拉强度逐渐减小, 峰值拉应变逐渐增大。第 3 阶段为自由水出现阶段, 随着含水率的不断增加, 重塑黏土中除结合水外, 在电场引力影响的范围之外还存在一部分水, 即自由水; 土颗粒之间存在自由水, 土中的基质吸力和毛细压力逐渐降低, 土体具有分散结构的特征, 此时, 随着含水率的增加, 重塑黏土的抗拉强度逐渐减小, 峰值拉应变逐渐增大。此外, 当含水率逐渐增加时, 重塑黏土中的结合水膜逐渐形成、变厚、甚至出现自由水, 在这个过程中, 土中水起到了润滑作用, 使土颗粒间的移动变得相对容易, 因此在重塑黏土的应力-应变曲线中峰前应力的斜率随着含水率的增加而不断降低。

3.3 拉伸速率对重塑黏土抗拉强度影响分析

拉伸速率的快慢影响着土颗粒之间的相对滑动, 主要包括两部分: 一部分是颗粒之间滑动时所产生的滑动摩擦; 另一部分是颗粒之间由于咬合所产生的咬合摩擦。当拉伸速率较小时, 土颗粒间更容易出现滚动、滑动等移动方式, 使得土颗粒间的咬合摩擦减小, 土体具有更好的延展性, 进而导致抗拉强度较低, 峰值拉应变较大。随着拉伸速率的增加, 土颗粒间的移动更倾向于直接克服咬合摩擦, 使得土体在受到拉力的时候, 需要更大的力来使其破坏, 土体延展性减弱, 土体变得更脆硬, 因此重塑黏土的抗拉强度逐渐增大, 峰值拉应变逐渐减小。

4 试验结果验证

4.1 模型的建立

本文通过离散元模拟方法对重塑黏土单轴拉伸试验结果进行验证。模型的建立如图 6 所示, 模型尺寸按照试验土样 1:1 建立, 颗粒间的黏结模型采用接触黏结模型。

模型试验颗粒的基本计算参数如表 5 所示。



图 6 试样模型

Fig. 6 Sample model

表 5 颗粒基本计算参数

Table 5 Basic calculation parameters of particles

参数项目	参数取值
颗粒切向刚度/(N·m ⁻¹)	1×10^5
颗粒法向刚度/(N·m ⁻¹)	1×10^5
黏结强度/kPa	24.09
颗粒密度/(kg·m ⁻³)	2 760
摩擦系数	0.35, 0.45, 0.55, 0.65

4.2 结果验证

以验证含水率为 20%, 拉伸速率为 10.8 mm/min 的单轴拉伸试验为例, 图 7 为各阶段的颗粒图, (II) 为各阶段的裂隙图, 图 8 为试样在验证过程中力链的变化。 O 点为起始阶段, 此时试样内部无裂缝。 OA 段为应力增加阶段, 该阶段试样不断被拉伸破坏, 部分颗粒的黏结失效。 A 点时试样达到峰值强度, 此时试样内部出现微小裂缝, 力链未出现明显断裂。 AC 段为试样的破坏阶段, 该阶段试样裂缝逐渐增大, 试样中心的力链逐渐断裂, 试样中部颗粒间的黏结逐渐失效, 具有

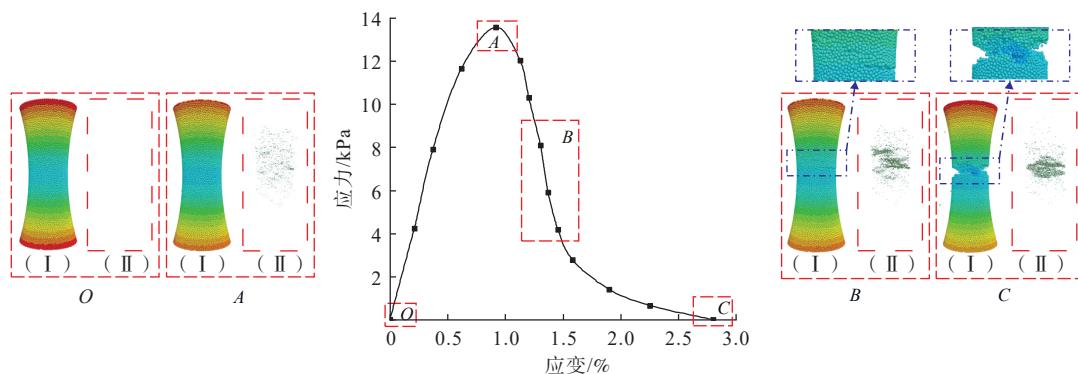


图 7 试样破坏过程及应力-应变曲线

Fig. 7 Failure process and stress-strain curve of sample

一定的软化特征, 应力随应变增加而逐渐减小。C 点试样完全破坏, 此时试样中心的力链完全断裂, 试样中部颗粒间的黏结完全失效, 出现一条贯通试样的主裂缝, 整个破坏过程与试验过程一致。

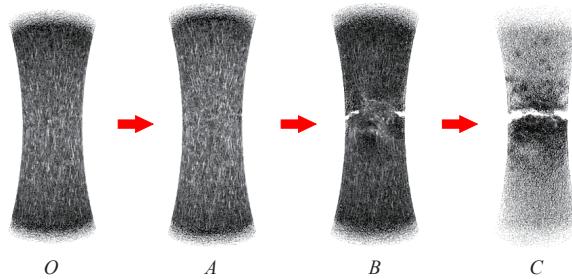


图 8 试样力链的变化过程

Fig. 8 Evolution process of sample force chains

将试验结果与验证结果对比(图 9), 其中图 9(a)为不同含水率的应力-应变曲线对比, 图 9(b)为不同拉伸速率的应力-应变曲线对比。从图中可以看到, 在不同含水率和拉伸速率下, 重塑黏土抗拉强度的变化规律与试验结果一致。

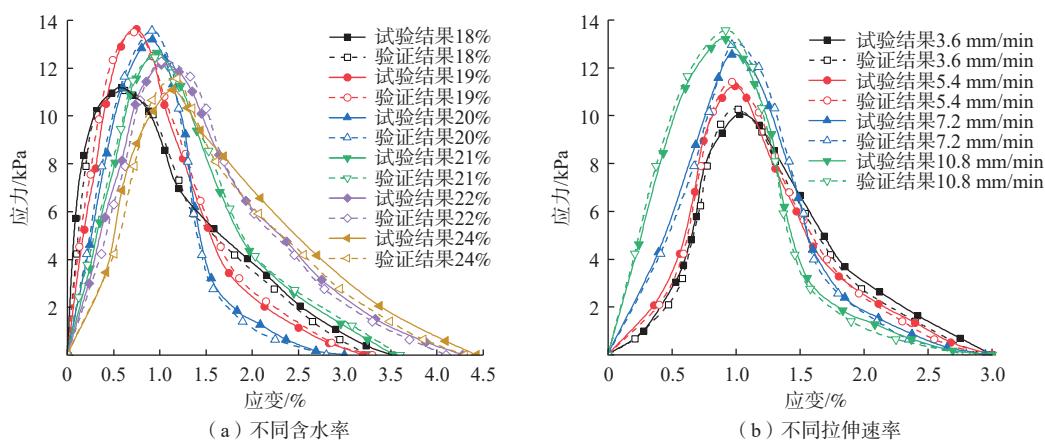


图 9 应力-应变曲线对比图

Fig. 9 Comparison of stress-strain curves

5 结论

(1) 随着含水率的增加, 重塑黏土的抗拉强度呈现出先上升后下降的趋势, 峰值抗拉强度出现在最优含水率附近, 峰值拉应变逐渐增大; 随着拉伸速率的增加, 重塑黏土的抗拉强度逐渐增大, 峰值拉应变逐渐减小。

(2) 试样的破坏首先从中间部分出现部分颗粒的黏结失效; 达到峰值强度后, 试样中心出现微小裂缝, 力链并未发生明显断裂; 随着应变的增大, 裂缝发生不规则的延伸扩展, 力链出现明显断裂; 最终, 形成一条贯穿试样中心的主裂缝, 力链完全断裂, 整个破坏过程与试验过程一致。在不同含水率和拉伸速率下, 重塑黏土抗拉强度的变化规律与试验结果一致。

在今后的研究工作中, 拟通过磁共振成像技术进一步探究土中水在土体受到拉力作用下对其抗拉强度的影响规律, 利用电子计算机断层扫描技术实时监控土体在拉伸作用下的变化规律, 从而验证本文的分析结果。

参考文献 (References) :

- [1] 陈林万, 张晓超, 裴向军, 等. 降雨诱发直线型黄土填方边坡失稳模型试验 [J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(6): 151 – 160. [CHEN Linwan, ZHANG Xiaochao, PEI Xiangjun, et al. Model test of the linear loess fill slope instability induced by rainfall [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(6): 151 – 160. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 王磊, 李荣建, 杨正午, 等. 强降雨作用下黄土陡坡开裂特性测试 [J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2021, 51(5): 1338 – 1346. [WANG Lei, LI Rongjian, YANG Zhengwu, et al. Experimental study on cracking characteristics of loess steep slope under intensive rainfall [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2021, 51(5): 1338 – 1346. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 孙萍萍, 张茂省, 江睿君, 等. 降雨诱发浅层黄土滑坡变形破坏机制 [J]. 地质通报, 2021, 40(10): 1617 – 1625. [SUN Pingping, ZHANG Maosheng, JIANG Ruijun, et al. Deformation and failure mechanism of rainfall-induced shallow loess landslide [J]. Geological Bulletin of China, 2021, 40(10): 1617 – 1625. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 杨志华, 郭长宝, 吴瑞安, 等. 青藏高原巴塘断裂带地震滑坡危险性预测研究 [J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(5): 91 – 101. [YANG Zhihua, GUO Changbao, WU Ruian, et al. Predicting seismic landslide hazard in the Batang fault zone of the Qinghai-Tibet Plateau [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(5): 91 – 101. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 李彩虹, 李雪, 郭长宝, 等. 青藏高原东部鲜水河断裂带地震滑坡危险性评价 [J]. 地质通报, 2022, 41(8): 1473 – 1486. [LI Caihong, LI Xue, GUO Changbao, et al. Seismic landslide hazards assessment along the Xianshuihe fault zone, Tibetan Plateau, China [J]. Geological Bulletin of China, 2022, 41(8): 1473 – 1486. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 王涛, 刘甲美, 栗泽桐, 等. 中国地震滑坡危险性评估及其对国土空间规划的影响研究 [J]. 中国地质, 2021, 48(1): 21 – 39. [WANG Tao, LIU Jiamei, LI Zetong, et al. Seismic landslide hazard assessment of China and its impact on national territory spatial planning [J]. Geology in China, 2021, 48(1): 21 – 39. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 成永刚, 吴六政, 赵晓彦. 高速公路路堤滑坡成因及治理方案研究 [J]. 铁道工程学报, 2015, 32(9): 25 – 29. [CHENG Yonggang, WU Liuzheng, ZHAO Xiaoyan. Research on the cause of expressway embankment landslides and their treatment scheme [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2015, 32(9): 25 – 29. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 赵海军, 马凤山, 李志清, 等. 喜马拉雅山区公路边坡崩滑灾害与防护措施破坏规律分析 [J]. 工程地质学报, 2022, 30(3): 656 – 671. [ZHAO Haijun, MA Fengshan, LI Zhiqing, et al. Geological hazards and protective measures of road slope in Himalayas Mountain Area [J]. Journal of Engineering Geology, 2022, 30(3): 656 – 671. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 汤连生, 桑海涛, 罗珍贵, 等. 土体抗拉张力学特性研究进展 [J]. 地球科学进展, 2015, 30(3): 297 – 309. [TANG Liansheng, SANG Haitao, LUO Zhengui, et al. Advances in research on the mechanical behavior of the tensile strength of soils [J]. Advances in Earth Science, 2015, 30(3): 297 – 309. (in Chinese with English abstract)]
- [10] THUSYANTHAN N I, TAKE W A, MADABHUSHI S P G, et al. Crack initiation in clay observed in beam bending [J]. Géotechnique, 2007, 57(7): 581 – 594.
- [11] VISWANADHAM B, JHA B, PAWAR S. Influence of geofibers on the flexural behavior of compacted soil beams [J]. Geosynthetics International, 2010, 17(2): 86 – 99.
- [12] AZMATCH T F, SEGO D C, ARENSON L U, et al. Tensile strength and stress-strain behaviour of Devon silt under frozen fringe conditions [J]. Cold Regions Science and Technology, 2011, 68(1/2): 85 – 90.
- [13] 李春清, 梁庆国, 吴旭阳, 等. 重塑黄土抗拉强度试验研究 [J]. 地震工程学报, 2014, 36(2): 233 – 238. [LI Chunqing, LIANG Qingguo, WU Xuyang, et al. Study on the test of tensile strength of remolded loess [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2014, 36(2): 233 – 238. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 黄珂, 姜冲, 陈庆, 等. 压实膨胀土抗拉强度试验研究 [J]. 长江科学院院报, 2017, 34(6): 93 – 96. [HUANG Ke, JIANG Chong, CHEN Qing, et al. Experimental study on tensile strength of compacted expansive soil [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2017, 34(6): 93 – 96. (in Chinese with English abstract)]
- [15] SHLOIDO G A. Determining the tensile strength of frozen ground [J]. Hydrotechnical Construction, 1968, 2(3): 238 – 240.
- [16] SOBHA K, MASHNAD M. Tensile strength and toughness of soil-cement-fly-ash composite reinforced with recycled high-density polyethylene strips [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2002, 14(2): 177 – 184.
- [17] ZHOU Guoqing, HU Kun, ZHAO Xiaodong, et al. Laboratory investigation on tensile strength characteristics

- of warm frozen soils[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2015, 113: 81 – 90.
- [18] AKIN I D, LIKOS W J. Brazilian tensile strength testing of compacted clay[J]. *Geotechnical Testing Journal*, 2017, 40: 608 – 617.
- [19] 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 – 186. [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 – 186. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 张辉, 朱俊高, 王俊杰, 等. 击实砾质土抗拉强度试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增刊 2): 4186 – 4190. [ZHANG Hui, ZHU Juncao, WANG Junjie, et al. Experimental study on tensile strength of compacted gravel soil[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(Sup 2): 4186 – 4190. (in Chinese with English abstract)]
- [21] LU Ning, WU Bailin, TAN C P. Tensile strength characteristics of unsaturated sands[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2007, 133(2): 144 – 154.
- [22] TAMRAKAR S B, MITACHI T, TOYOSAWA Y. Measurement of soil tensile strength and factors affecting its measurements[J]. *Soils and Foundations*, 2007, 47(5): 911 – 918.
- [23] 李建, 唐朝生, 王德银, 等. 纤维加筋土的抗拉强度试验研究 [J]. 工程地质学报, 2012, 20(增刊 1): 655 – 660. [LI Jian, TANG Chaosheng, WANG Deyin, et al. Experimental study on the tensile strength of fiber reinforced soil[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2012, 20(Sup 1): 655 – 660. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 路立娜, 樊恒辉, 陈华, 等. 分散性土单轴抗拉强度影响因素试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2014, 36(6): 1160 – 1166. [LU Li'na, FAN Henghui, CHEN Hua, et al. Influencing factors for uniaxial tensile strength of dispersive soils[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2014, 36(6): 1160 – 1166. (in Chinese with English abstract)]
- [25] 张绪涛, 张强勇, 高强, 等. 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, GAO Qiang, et al. Development and application of geotechnical direct tension test devices[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2014, 36(7): 1309 – 1315. (in Chinese with English abstract)]
- [26] 张云, 陈梦芸. 击实黏土抗拉强度研究 [J]. 水文地质工程地质, 2015, 42(4): 56 – 60. [ZHANG Yun, CHEN Mengyun. Tensile strength of compacted clay[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2015, 42(4): 56 – 60. (in Chinese with English abstract)]
- [27] 崔猛, 韩尚宇, 洪宝宁. 新型土工单轴拉伸试验装置的研制及应用 [J]. 岩土力学, 2017, 38(6): 1832 – 1840. [CUI Meng, HAN Shangyu, HONG Baoning. Development and application of a new geotechnical device for direct tension test[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, 38(6): 1832 – 1840. (in Chinese with English abstract)]
- [28] 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 – 104. [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 – 104. (in Chinese with English abstract)]
- [29] 蔡国庆, 车睿杰, 孔小昂, 等. 非饱和砂土抗拉强度的试验研究 [J]. 水利学报, 2017, 48(5): 623 – 630. [CAI Guoqing, CHE Ruijie, KONG Xiaoang, et al. Experimental investigation on tensile strength of unsaturated fine sands[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2017, 48(5): 623 – 630. (in Chinese with English abstract)]
- [30] 李梓月. 非饱和黏性土抗拉强度试验研究 [D]. 武汉: 湖北工业大学, 2021. [LI Ziyue. Experimental study on tensile strength of unsaturated cohesive soil[D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2021. (in Chinese with English abstract)]
- [31] 张国华. 压实膨胀土的抗拉强度及拉-剪联合强度公式 [J]. 铁道标准设计, 2022, 66(5): 68 – 72. [ZHANG Guohua. Tensile strength and tensile-shear combined strength formula for compacted expansive soil[J]. *Railway Standard Design*, 2022, 66(5): 68 – 72. (in Chinese with English abstract)]
- [32] 魏洪山, 王伟志, 徐永福, 等. 水泥改良土的拉伸强度特性及其计算方法 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(6): 81 – 89. [WEI Hongshan, WANG Weizhi, XU Yongfu, et al. Tensile strength characteristics and calculation methods of the cement stabilized soil[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2022, 49(6): 81 – 89. (in Chinese with English abstract)]
- [33] 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. (in Chinese)]