

DOI: 10.11779/CJGE201406023

分散性土单轴抗拉强度影响因素试验研究

路立娜, 樊恒辉*, 陈 华, 马东林, 王中妮, 贺智强

(西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100)

摘 要: 为准确测定土体的抗拉强度, 采用自行研制的制样模具和电动式单轴拉伸仪, 对分散性土单轴抗拉强度影响因素及其断裂机理进行分析研究, 并以非分散性土和过渡性土作为对照。试验结果表明: 试样长径比取 2.5, 拉伸速率取 0.8 mm/min 可有效避免端部效应和自重影响。分散性土、非分散性土和过渡性土的单轴抗拉强度随含水率的增大而减小, 随压实度和黏粒含量的增大而增大, 其变化趋势基本相同。与非分散性土和过渡性土的单轴抗拉强度相比, 分散性土的单轴抗拉强度显著低于非分散性土和过渡性土。究其原因, 主要是分散性土中含有一定量的钠离子和 pH 较高, 使得土颗粒表面的扩散双电层厚度增加, 颗粒间的引力降低, 斥力增大, 宏观表现为单轴抗拉强度降低。

关键词: 分散性土; 单轴抗拉强度; 含水率; 压实度; 黏粒含量

中图分类号: TU475

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2014)06-1160-07

作者简介: 路立娜(1987-), 女, 河北邢台人, 硕士, 主要从事特殊性土的工程性质及其改良技术研究。E-mail: lulina198708@163.com。

Influencing factors for uniaxial tensile strength of dispersive soils

LU Li-na, FAN Heng-hui, CHEN Hua, MA Dong-lin, WANG Zhong-ni, HE Zhi-qiang

(College of Water Conservancy and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: In order to measure the tensile strength accurately, by using the self-developed moulds and the electric uniaxial tensile tester and comparing the transitional soils with the non-dispersive ones, the influencing factors for tensile strength and fracture mechanism of dispersive soils are studied. The experimental results show that the tester can effectively avoid the end effect and the influence of weight if the length-diameter aspect ratio is 2.5 and the tensile rate is 0.8 mm/min. The uniaxial tensile strengths of the three kinds of soil samples all decrease with the increase of the moisture content and increase with the increase of compactness and clay content. The uniaxial tensile strength of the dispersive soils is lower than that of the transitional soils and non-dispersive soils. The main reasons are that the dispersive soils have a certain amount of Na^+ and alkaline pH. These factors make the diffusion double layers thicker and lead to smaller gravitational and larger repulsion among particles. Thus the tensile strength becomes lower macroscopically.

Key words: dispersive soil; uniaxial tensile strength; moisture content; compactness; clay content

0 引 言

单轴抗拉强度是试样只在单向拉力作用下达至断裂破坏时的极限正应力^[1]。土体抗拉强度对其内部和表面产生的张拉裂缝起决定性作用, 比如堆石坝或土石坝心墙土料在外部坝料的拱效应作用下产生的水力劈裂^[2]; 土坡在滑动前, 由于土体移动速度大小或方向不一致, 导致坡顶常出现张拉裂缝; 受拉建筑物、道路、桥梁等工程的基础, 由于拉伸或地基土不均匀沉降形成的张拉裂缝, 最终导致工程事故发生, 所以抗拉强度与土体的抗压强度、抗剪强度一样, 也是土体很重要的力学指标之一。测定土体抗拉强度的试验方法有直接测量法和间接测量法。直接测量法有单轴拉伸法和三轴拉伸法, 间接测量法有土梁弯曲法、空

心圆柱法、径向压裂法、轴向压裂法^[3]。党进谦等^[4]采用自行研制的简易单轴拉伸仪对黄土单轴拉裂特性做出了研究, 提出原状黄土在拉力作用下的破坏一般为脆性破坏; 吕海波等^[5]对胀缩性土抗拉强度随干湿循环次数等因素的变化规律做出了研究; 李全明等^[6]采用弥散裂缝理论, 通过数值模拟提出土体张拉断裂是脆性断裂, 并模拟了裂缝的发展过程。前人关于土体抗拉强度的研究主要集中于黄土^[7]、冻土^[8]等特殊

基金项目: 国家自然科学基金项目(51379177); 陕西省外国专家局留学人员科技活动项目; 中央高校基本科研业务费专项资金项目(ZD2013013)

收稿日期: 2013-08-06

*通讯作者

土。但是, 目前还没有关于分散性土抗拉强度的研究。

在岩土工程中, 依据黏性土在渗流作用下的稳定性可分为分散性土、过渡性土和非分散性土^[9]。分散性土是指在低含盐量或纯净水中, 细颗粒之间的黏聚力大部分, 甚至全部消失, 呈团聚体存在的颗粒体自行分散成原级土颗粒的黏性土。其分散的本质在于土颗粒之间的吸引力小于排斥力, 净势能表现为斥力能, 从而导致土颗粒分散。由于采用分散性土修建的水利工程多有破坏, 如美国的 Grenada 大坝^[10]、澳大利亚的 Kilmore 均质坝^[11]、中国的岭落水库大坝^[12]等, 所以对分散性土的研究至关重要。

试验以土体受拉特性及土工试验为基础, 结合前人土体拉伸试验方法, 自行研制了一次静压成型制样模具和电动式单轴拉伸仪, 确定单轴拉伸试验适宜的拉伸速率和试样长径比; 以非分散性土和过渡性土为对照, 研究分散性土单轴抗拉强度随含水率、压实度、黏粒含量的变化规律; 结合土力学、土壤物理化学等理论知识进一步分析分散性土的抗拉断裂机理。

1 试验土样

本试验用土为重塑土, 取自陕西省杨凌示范区高速公路路基填筑土料, 取土深度 5~6 m, 天然含水率为 20.3%, 干密度为 1.66 g/cm³。将杨凌土风干, 过 2

mm 筛。为了方便研究, 人工配制过渡性土和分散性土。根据分散性土的分散机理, 在杨凌土中掺加质量分数分别为 0.09%和 0.16%的 Na₂CO₃, 配制成过渡性土和分散性土, 并采用针孔试验、双比重计试验、碎块试验、孔隙水可溶性阳离子试验和交换性钠离子百分比试验等对 3 种土样的分散性进行了判别, 试验结果表明杨凌土为非分散性土, 掺加质量分数为 0.09% Na₂CO₃ 的土样为过渡性土, 掺加质量分数为 0.16% Na₂CO₃ 土样为分散性土。土样的各项物理化学指标见表 1。

从表 1 可看出, 杨凌土中掺加质量分数为 0.09%, 0.16%的 Na₂CO₃, 土样的颗粒相对密度、颗粒组成、击实试验、中溶盐、难溶盐、有机质等没有变化或变化甚微, 而界限含水率、易溶盐、pH 和钠离子百分比 (PS)、交换性钠离子百分比 (ESP) 有显著变化。由于在杨凌土中掺加 Na₂CO₃, 土体中引入大量的钠离子, 并且由于碳酸根水解作用, 土体呈强碱性, 使得土体的分散性增强。

2 试验仪器与方法

2.1 试验仪器

基于前人对土体抗拉强度的研究和土体的拉伸特性, 自行研制了制样模具 (见图 1) 和电动式单轴拉

表 1 土样的物理化学性质

Table 1 Physical and chemical properties of soil samples																
土样名称	颗粒相对密度	颗粒组成/%			液限 w _L /%	塑限 w _P /%	塑性指数 I _p	最大干密度 ρ _{dmax} /(g·cm ⁻³)	最优含水率 w _{op} /%	易溶盐 /%	中溶盐 /%	难溶盐 /%	有机质 /%	pH 值	钠离子百分比 /%	交换性钠离子百分比 /%
		砂粒	粉粒	黏粒												
非分散性土	2.71	0.7	74.0	25.4	38.0	21.8	16.2	1.70	18.6	0.05	0.07	11.40	0.91	8.87	0.6	1.66
过渡性土	2.71	0.7	74.0	25.4	33.5	23.3	10.2	1.71	18.4	0.15	0.07	11.40	0.91	9.59	36.9	7.53
分散性土	2.71	0.7	74.0	25.4	34.0	21.8	12.2	1.71	18.4	0.19	0.07	11.40	0.91	9.88	88.0	22.23

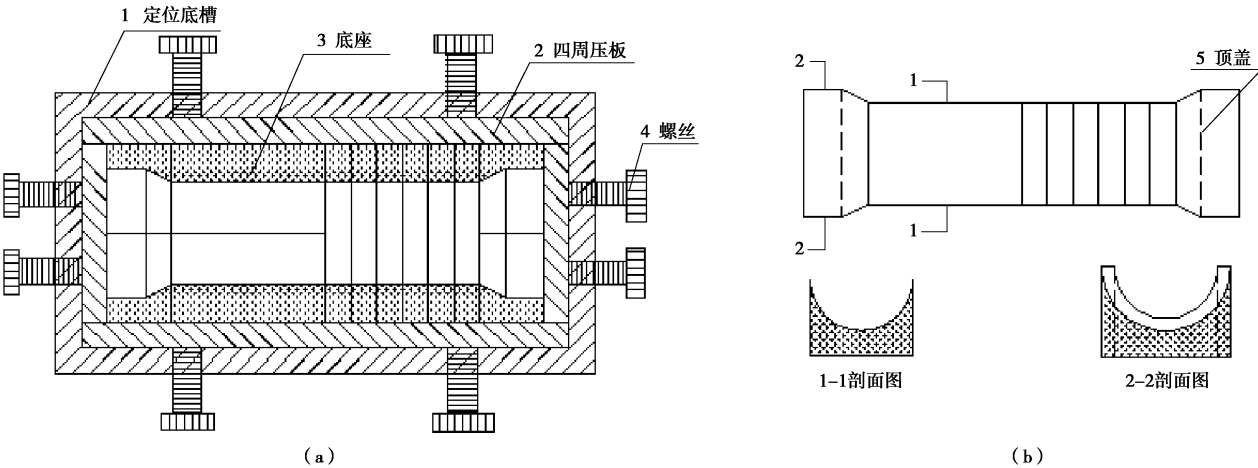


图 1 制样模具示意图

Fig. 1 Schematic diagram of test sample mould

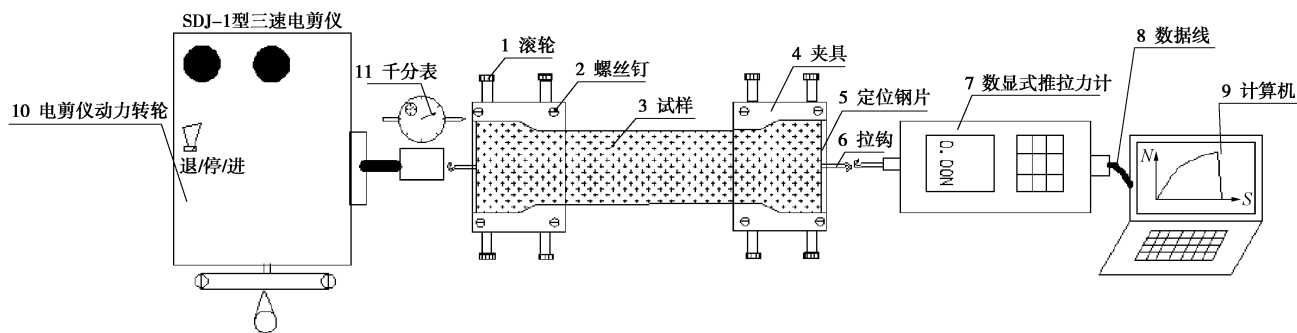


图 2 拉伸仪示意图

Fig. 2 Schematic diagram of tensile tester

伸仪（见图 2）。制样模具主要包括定位底槽、四周压板、底座、螺丝、顶盖等 5 部分。试样静压成型，呈哑铃状，其中部直径为 4 cm，长度根据需要可调节，调节范围 8~11 cm，该段长度为试样的有效长度（应变计算长度）；两端直径为 5 cm，长度为 1.5 cm 的圆柱体，两端和中间通过圆台连接，圆台长度 1 cm，避免了连接处直径突变成应力集中，该段为试样的固定端。为了方便取出试样，在底座和顶盖内表面涂抹适量凡士林，同时也减少了在制样和拉伸过程中含水率的变化。

电动式单轴拉伸仪用 SDJ-1 型三速电剪仪改装，主要由动力装置、位移测量装置、夹具、数据采集装置等 4 部分构成。动力装置利用电剪仪的电动转轮，通过拉杆与夹具拉钩连接，可施加连续水平拉伸荷载，准确测量试样断裂时的最大荷载，避免了前人试验中分级加载，取最后两次荷载平均值作为断裂时荷载的弊端。位移测量装置采用百分表，将百分表固定在电剪仪支架转轮一端，调整连接杆的位置，使测杆与夹具的接触片接触，在拉伸过程中通过测定夹具的位移，间接确定试样的拉伸变形量。夹具用有机玻璃制作，分上下两半，用螺丝固定后能与试样两端很好地吻合、固定，通过拉钩分别与动力转轮拉杆和数据采集装置连接。数据采集装置包括数显式推拉力计、数据线、计算机，实现了实时记录数据，便于观测在整个试验过程中拉力随位移的变化规律。

2.2 试验方法

取过 2 mm 筛的土样，采用去离子水配制到试验要求的含水率，按固定端和中间有效长度的体积和试样密度分别计算所需土料的质量，依次将各部分土填入制样模具内并稍加压实，覆盖上部压板，用千斤顶通过上部整体刚性压板下压，一次静压成型，注意压样过程中千斤顶荷载要缓慢施加，以保证试样内部土颗粒之间均匀压实，并且压到终止位置后静置 2~3 min，防止试样体积回弹。

将制好的试样用夹具固定，调整位置，保证转轮拉杆、夹具、试样、推拉力计的轴线水平且重合。转

动转轮，调整试样位置，使推拉力计中刚有示数为宜，接通电源开始拉伸，直至试样拉断，切断电源，试验结束，记录百分表读数和数显式推拉力计的读数。试样单轴抗拉强度（ δ_T ）及应变（ ε ）的计算方法为

$$\delta_T = T / A_0 \quad , \quad (1)$$

$$\varepsilon = \Delta L / L \quad . \quad (2)$$

式中， T 为轴向拉力； A_0 为试样初始面积； ΔL 为试样中部变形量； L 为试样中部的有效长度。

2.3 试样长径比及拉伸速率的确定

通过试验确定试样适宜的长径比及拉伸速率。土样选取杨凌土（非分散性土），含水率为最优含水率（18.6%），干密度为最大干密度（1.70 g/cm³）。试样有效长度分别为 8, 9, 10, 11 cm，拉伸速率采用 0.02, 0.80, 2.40 mm/min（对应电剪仪的剪切速率分别是 0.1, 4, 12 r/min）。试验结果见表 2, 3。

表 2 试样长径比对单轴抗拉强度的影响

Table 2 Effect of length-diameter on uniaxial tensile strength					
试样有效长度 L/cm	试样直径 ϕ/cm	试样长径比 r	拉伸速率 $v/(\text{mm}\cdot\text{min}^{-1})$	抗拉强度 δ_T/kPa	断面与端部间的最短距离/cm
8	4	2.00	0.8	42.26	1.4~2.3
9	4	2.25	0.8	41.42	2.5~3.2
10	4	2.50	0.8	38.41	3.4~5.1
11	4	2.75	0.8	35.50	3.3~5.4

表 3 拉伸速率对单轴抗拉强度的影响

Table 3 Effect of tensile rate on uniaxial tensile strength					
拉伸速率 $v/(\text{mm}\cdot\text{min}^{-1})$	试样有效长度 L/cm	试样直径 ϕ/cm	试样长径比 r	应变 $\varepsilon/\%$	抗拉强度 δ_T/kPa
0.02	10	4	2.5	0.845	34.36
0.80	10	4	2.5	0.460	38.41
2.40	10	4	2.5	0.335	41.89

为了避免拉伸时两端夹具对试样抗拉强度的影响，应尽量保证试样的断裂面靠近中部。试验中采取软接触和适当增加试样长度的方法来解决这一问题。在试样的固定端包一层橡胶薄膜，使试样固定端与夹具之间软接触，缓冲夹具对试样的挤压作用力。由表

2 看出,当试样长径比较小时(8, 9 cm),断面与端部间的最短距离较小,一般小于有效长度的 1/3,强度值偏大;长径比较大时(10 cm),断裂面几乎位于有效长度 1/2 附近,接近中部,但是当长径比过大时(11 cm),虽然断裂面几乎位于中部,但测得的强度值较小。这是因为试样有效长度较小时,端部效应显著,断裂面距端部较近,且强度值偏大;有效长度过大,虽然能避免端部影响,但拉伸时受自重影响较大,测得的强度值偏小。所以本试验选择长径比为 2.5,即长度 10 cm,直径 4 cm 的试样,既能减小端部效应的影响,又能减小自重影响。

由表 3 可知,随拉伸速率增大,单轴抗拉强度有增大趋势,而应变逐渐减小;相反,拉伸速率减小时,单轴抗拉强度变小,应变增大。究其原因,主要是由于抗拉强度受试样内部的孔隙水压力作用。在慢速拉伸过程中,荷载增加速度慢,试样内部的孔隙水压力逐渐消散;而当拉伸速率较大时,荷载增加速度较快,持续时间短,试样内部的孔隙水压力来不及消散,测得的强度值偏大。综合考虑,本试验选择的拉伸速率为 0.8 mm/min。

3 抗拉强度影响因素研究

土体抗拉强度主要来源于以下 3 个方面:①土颗粒表面水膜的物理化学作用、黏土矿物颗粒的黏结力和颗粒间分子力形成的凝聚力;②碳酸盐、石膏及包围在颗粒外部的盐类薄膜胶结形成的凝聚力;③非饱和土中的基质吸力和毛细吸力形成的吸附强度^[13]。所以土体抗拉强度受到多方面因素的影响,如含水率的大小、孔隙溶液的浓度、所含阳离子种类、黏粒含量、矿物成分的种类和含量等^[14-15]。本试验主要针对含水率、压实度、黏粒含量对分散性土单轴抗拉强度的影响进行试验研究。

3.1 单轴抗拉强度随含水率的变化规律

将非分散性土、过渡性土、分散性土分别掺加不同量的去离子水,使其含水率分别在 $w_{op}-4\%$, $w_{op}-2\%$, w_{op} , $w_{op}+2\%$, $w_{op}+4\%$ 附近,放置 48 h,使水分布均匀。按干密度 1.70 g/cm^3 制备试样,研究抗拉强度随含水率的变化规律。试验结果见图 3。

图 3 表明,非分散性土、过渡性土和分散性土的单轴抗拉强度均随含水率的增大呈下降趋势。在同样含水率的条件下,非分散性土与过渡性土的曲线几乎重合,但分散性土的曲线明显位于非分散性土和过渡性土的下方,即分散性土的单轴抗拉强度明显低于非分散性土和过渡性土。但是,随着含水率的逐渐增加,分散性土的单轴抗拉强度曲线与非分散性土和过渡性

的曲线渐趋接近,即两者之间的差值逐渐减少,如在含水率为 14.6% 时,分散性土和非分散性土抗拉强度差值为 32.72 kPa,而在含水率为 21.5% 时,两者之间的差值缩小为 8.28 kPa。也就是说,随着含水率的增加,分散性土与非分散性土和过渡性土之间的单轴抗拉强度有接近的趋势,它们之间的差别逐渐减少。这表明,分散性土的单轴抗拉强度在低含水率(小于最优含水率)段对含水率的变化不是十分敏感,而非分散性土则反之。

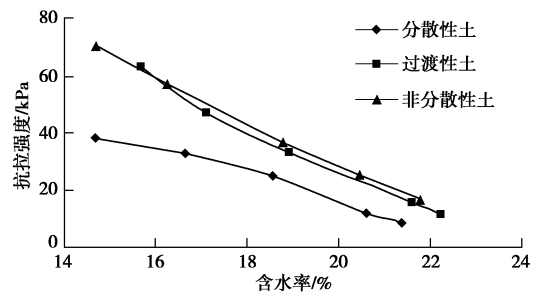


图 3 单轴抗拉强度随含水率的变化规律

Fig. 3 Change of uniaxial tensile strength with moisture content

土体抗拉强度随含水率的增加而降低,这与非饱和土中的基质吸力和毛细吸力形成的吸附强度有关。在非饱和条件下,基质吸力对含水率的变化比较敏感,基质吸力随含水率的增大而减小。土体中的水除了一部分以结晶水紧紧吸附于固体颗粒的晶体内格外,还存在着吸着水和自由水两类。吸着水的作用力主要是物理化学力,而自由水中的毛细管水主要作用力是表面张力和重力,自由水中的重力水主要作用力是重力。随着含水率的增大,土体中的毛细管渐渐被重力水所充满,土颗粒之间由于毛细作用而形成的表面张力逐渐减弱,基质吸力降低,土颗粒之间的黏聚力下降,导致抗拉强度降低。

3.2 单轴抗拉强度随压实度的变化规律

将非分散性土、过渡性土、分散性土分别掺加不同量的去离子水,使其含水率均为最优含水率,放置 48 h,使水分布均匀。分别按干密度 1.56, 1.60, 1.63, 1.67, 1.70 g/cm^3 制备试样,对应的压实度分别为 0.92, 0.94, 0.96, 0.98, 1.00, 研究抗拉强度随压实度的变化规律。试验结果见图 4。

图 4 表明,非分散性土、过渡性土、分散性土的单轴抗拉强度均随压实度的增加而增大。在同一压实度条件下,非分散性土的抗拉强度最大,分散性土的抗拉强度最小;低压实度条件下三者的单轴抗拉强度相差不大,随着压实度的增加,三者的单轴抗拉强度的差距逐渐增大,如在压实度为 0.92 时,非分散性土、过渡性土和分散性土的单轴抗拉强度分别为 15.5, 14.8, 13.7 kPa,而在压实度为 1.00 时,非分散性土、过渡

性土和分散性土的单轴抗拉强度分别为 34.6, 33.3, 27.4 kPa。试验表明, 分散性土的抗拉强度明显小于非分散性土和过渡性土。

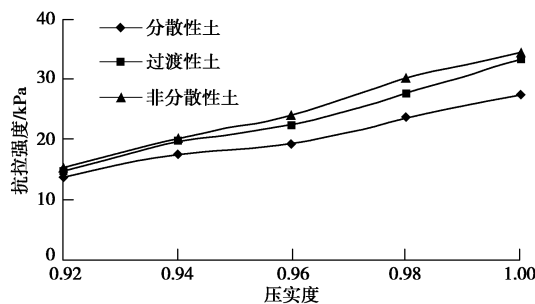


图 4 抗拉强度随压实度的变化规律

Fig. 4 Change of uniaxial tensile strength with compactness

土体抗拉强度随压实度的增加而增大, 这是因为随压实度的增大, 土体挤压更密实, 颗粒间的孔隙数量减少, 土颗粒之间逐渐接近, 相互间的引力和凝聚力逐渐增加, 表现为抗拉强度逐渐增大。在低压实度条件下, 对抗拉强度起决定作用的是颗粒间的凝聚力, 主要受颗粒排列情况、颗粒间孔隙大小的影响, 随着压实度的增加, 颗粒排列逐渐紧凑, 颗粒间的孔隙逐渐被挤压密实, 凝聚力增大趋势减小, 主导作用变为颗粒间的分子力, 所以三者的单轴抗拉强度在低压实度条件下相差不大。随着压实度的增加, 土的细微结构无论在数量上、层次上以及复杂程度上都有明显的增加, 孔隙的半径越小, 弯液面的曲率越大, 基质吸力越大, 使得土体抗拉强度变大。

3.3 单轴抗拉强度随黏粒含量的变化规律

根据司笃克斯沉降原理 (Stokes' law), 即土粒沉降的速度依其粒径的大小而不同, 粒径越大沉降速度越快, 粒径越小沉降速度越慢, 制备不同黏粒含量的土料。具体做法如下: 将非分散性土、过渡性土和分散性土按土水比为 1:4 的质量比分别放入大桶内, 用玻璃棒沿同一个方向快速搅拌 20 min, 使土颗粒充分水化、离散, 然后静置, 待水分蒸发后, 将土的沉积层平均分 5 层取出, 从上到下依次编为 #1, #2, #3, #4, #5, 风干, 研磨过 2 mm 筛, 分别测定各层黏粒含量及分散性, 测定结果见表 4。经分散性试验, 各种土样的各层均保持原有的分散特性, 即分散性土各层均为分散性土, 过渡性土各层均为过渡性土, 非分散性土各层均为非分散性土。

将非分散性土、过渡性土和分散性土的各层分别掺加不同量的去离子水, 使其含水率均为最优含水率, 放置 48 h, 使水分布均匀。按干密度 1.70 g/cm³ 制备试样, 研究抗拉强度随黏粒含量的变化规律。试验结果见图 5。

表 4 各层黏粒含量
Table 4 Clay contents of soil layers (%)

层号 (自上而下)	分散性土	过渡性土	非分散性土
#1	70.1	72.4	75.3
#2	61.2	58.9	71.3
#3	48.0	46.7	49.9
#4	20.0	19.5	22.9
#5	16.3	15.9	18.4

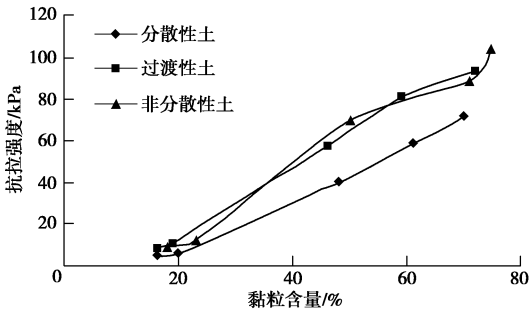


图 5 抗拉强度随黏粒含量的变化规律

Fig. 5 Change of uniaxial tensile strength with clay content

图 5 表明, 非分散性土、过渡性土和分散性土的单轴抗拉强度均随黏粒含量的增加而增大。非分散性土和过渡性土的抗拉强度曲线几乎重合, 也就是说在黏粒含量相同时, 非分散性土和过渡性土的抗拉强度几乎相等。在黏粒含量较低时, 分散性土的单轴抗拉强度与非分散性土和过渡性土的相差不大, 如在黏粒含量为 16% 左右时, 非分散性土、过渡性土和分散性土的单轴抗拉强度分别为 10.1, 9.3, 4.6 kPa; 但是随黏粒含量的增加, 分散性土的抗拉强度增加的趋势小于非分散性土和过渡性土, 抗拉强度偏低, 如在黏粒含量为 70% 左右时, 非分散性土、过渡性土和分散性土的单轴抗拉强度分别为 88.9, 93.2, 72.1 kPa。

土体抗拉强度随黏粒含量的增加而增大, 其原因在于黏土颗粒细小, 具有很大的比表面积, 黏结力很强。当然, 除了这方面的原因外, 还影响土体内细小孔隙的含量、结构。一般而言, 土的基质吸力随着黏粒含量的增加而增大。如果土体中的黏粒含量比较大, 则土颗粒之间的黏结力比较强, 基质吸力增大, 使得土体的抗拉强度增大。

3.4 分散性土受拉断裂机理分析

以上试验结果表明, 分散性土单轴抗拉强度比非分散性土、过渡性土的单轴抗拉强度低。在含水率较高、压实度较低和黏粒含量较低时, 三者之间的差异不是很明显, 但是在含水率较低, 压实度较高和黏粒含量较高时, 三者之间的差异显著。出现上述现象的原因与分散性土的分散机理, 也就是分散性土的物理化学特征有关。

研究表明, 分散性土体中含有一定量的钠离子,

并且土体呈强碱性^[16-17]。由于同晶置换等作用,黏土矿物往往带有一定量的负电荷,为了维持电平衡状态,土体需要吸附阳离子。如果土体中含有大量的钠离子,会使得土颗粒吸附较多的钠离子,而钠离子的水化半径比较厚,使得土颗粒表面的双电层厚度增加,土颗粒之间的斥力增大,引力下降,土颗粒分散。由于碱性促使土颗粒的负电荷增加,所以如果土体处在碱性的介质环境中,会加剧了土体颗粒的分散。土体颗粒之间的分散性增加,其宏观现象则表现为土体的抗拉强度降低。

本试验采用的分散性土、过渡性土和非分散性土之间的区别仅仅在于土体中 Na_2CO_3 含量不同,而其他因素如颗粒相对密度、颗粒级配、矿物成分、中溶盐、难溶盐、有机质等都相同。 Na_2CO_3 掺入土体后,不仅引起了土体的钠离子含量增加,而且土体的碱性增强。钠离子一部分以易溶盐的形式存在,一部分溶解于孔隙水溶液中(钠离子百分比,PS),还有一部分被黏土颗粒所吸附(交换性钠离子百分比,ESP)。土体的物理化学性质试验表明(见表1),分散性土的ESP、PS和pH明显高于过渡性土和非分散性土,这使得分散性土的土颗粒表面负电荷增加,吸附大量的钠离子,进一步引起土颗粒的双电层厚度较大,颗粒间引力降低,斥力增大,从而抗拉强度最低。

另一方面,在高含水率、低压实度和低黏粒含量条件下,分散性土的土颗粒间斥力与引力关系与过渡性土、非分散性土的差别不是很明显,三者之间抗拉强度的区别就比较小;而在低含水率、高压实度和高黏粒含量时,分散性土的土颗粒间斥力与引力关系与过渡性土、非分散性土的差别比较显著,三者之间抗拉强度的区别就明显增大。如在高黏粒含量时,分散性土中的黏土颗粒所吸附的钠离子增多,双电层厚度增加,土颗粒之间的距离增大,其斥力也随之增大,使得分散性增强,抗拉强度降低。与非分散性土相比,虽然随着黏粒含量的增加,抗拉强度也增加,但增加的程度较非分散性土低,故两者之间的差别就有增加的趋势。

4 结 论

(1)本文研制的制样模具和电动式单轴拉伸仪为研究土体的抗拉性能提供了较好的途径,该仪器具有物理意义明确,操作简单,成本低和精度高的特点。试样长径比和拉伸速率对试样单轴抗拉强度和应变有很大影响,建议试样长径比取2.5,拉伸速率取0.8 mm/min可有效避免端部效应和试样自重对试验的影响。

(2)分散性土的单轴抗拉强度随压实度的增大而增大,随含水率的增大而减小,随着黏粒含量的增加而增加。这种现象与过渡性土和非分散性土的变化趋势相似,但是分散性土的抗拉强度值明显低于过渡性土和非分散性土,这与分散性土中含有一定量的钠离子和酸碱度呈碱性有密切关系,这两方面的原因使得土颗粒表面的扩散双电层厚度增加,颗粒间的引力降低,斥力增大,宏观表现为抗拉强度的降低。

(3)分散性土的单轴抗拉强度除受含水率、压实度、黏粒含量等因素的影响外,还与钠离子百分比(PS)、交换性钠离子百分比(ESP)和pH等化学因素有关。建议在研究黏性土分散机理的基础上,深入研究黏性土抗拉强度的变化规律。

参考文献:

- [1] SL 237—1999 土工试验规程[S]. 1999. (SL 237—1999 Specification of soil test[S]. 1999. (in Chinese))
- [2] 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(2): 4186 - 4190. (ZHANG Hui, ZHU Jun-gao, WANG Jun-jie, et al. Experimental study on tensile strength of compacted gravel soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(2): 4186 - 4190. (in Chinese))
- [3] 陈有亮, 王 明, 徐 珊, 等. 上海人工冻结软黏土抗压抗拉强度试验研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(7): 1046 - 1051. (CHEN You-liang, WANG Ming, XU Shan, et al. Tensile and compressive strength tests on artificial soft clay in Shanghai[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(7): 1046 - 1051. (in Chinese))
- [4] 党进谦, 李 靖, 张伯平. 黄土单轴拉裂特性的研究[J]. 水力发电学报, 2001, 75(4): 44 - 48. (DANG Jin-qian, LI Jing, ZHANG Bo-ping. Study on uniaxial tensile splitting characteristics of loess[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2001, 75(4): 44 - 48. (in Chinese))
- [5] 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 - 62. (LÜ Hai-bo, ZENG Shao-tian, GE Ruo-dong, et al. Experimental study of tensile strength of swell-shrink soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(3): 615 - 62. (in Chinese))
- [6] 李全明, 于玉贞, 张丙印, 等. 压实黏土的脆性断裂模型及有限元算法[J]. 岩土力学, 2006, 27(9): 1527 - 1532. (LI Quan-ming, YU Yu-zhen, ZHANG Bing-yin, et al. Brittle fracture model of compacted cohesive soil and finite element method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(9): 1527 - 1532. (in Chinese))

- [7] 孙 萍, 彭建兵, 陈立伟, 等. 黄土拉张破坏特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2009, **31**(6): 980 - 984. (SUN Ping, PENG JIAN-bing, CHEN Li-wei, et al. Experimental research on tensile fracture characteristics of loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, **31**(6): 980 - 984. (in Chinese))
- [8] AKAGAWA Satoshi, NISHISATO Kohei. Tensile strength of frozen soil in the temperature range of the frozen fringe[J]. Cold Regions Science and Technology, 2009, **57**: 13 - 22.
- [9] 樊恒辉, 孔令伟. 分散性土研究[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2012. (FAN Heng-hui, KONG Ling-wei. Study of dispersive soil[M]. Beijing: China WaterPower Press, 2012. (in Chinese))
- [10] Perry Edward B. Susceptibility of dispersive clay at Grenada Dam, Mississippi, to piping and rainfall erosion[R]. Vicksburg Miss: Geotechnical lab, Army Engineer Waterways Experiment Station, 1979.
- [11] PHILLIPS J T. Case histories of repairs and designs for dams built with dispersive clay[M]// Dispersive clays, related piping, and erosion in geotechnical projects, ASTM STP 623, SHERARD J L, DECKER R S, eds, American Society for Testing and Material, 1977: 330 - 340.
- [12] 崔亦昊, 谢定松, 杨凯虹, 等. 分散性土均质土坝渗透破坏性状及溃坝原因[J]. 水利水电技术, 2004, **35**(12): 42 - 45. (CUI Yi-hao, XIE Ding-song, YANG Kai-hong, et al. Character of seepage failure and collapse cause of dispersive clay homogeneous earth dam[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2004, **35** (12): 42 - 45. (in Chinese))
- [13] 冉龙洲, 宋翔东, 唐朝生. 干燥过程中膨胀土抗拉强度特性研究[J]. 工程地质学报, 2011, **19**(4): 620 - 625. (RAN Long-zhou, SONG Xiang-dong, TANG Chao-sheng. Laboratorial investigation on tensile strength of expansive soil during drying[J]. Journal of Engineering Geology, 2011, **19**(4): 620 - 625. (in Chinese))
- [14] BARZEGAR A R, RENGASAMY P, OADES J M. Effects of clay type and rate of wetting on the mellowing of compacted soils[J]. Geoderma, 1995, **68**: 39 - 49.
- [15] BARZEGAR A R, OADES J M. Tensile strength of dry, remolded soils as affected by properties of the clay fraction by properties of the clay fraction by properties of the clay fraction[J]. Geoderma, 1994, **65**: 93 - 108.
- [16] 樊恒辉, 李洪良, 赵高文. 黏性土的物理化学及矿物学性质与分散机理[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(9): 1740 - 1745. (FAN Heng-hui, LI Hong-liang, ZHAO Gao-wen. Relation among dispersive mechanism, physical-chemical and mineral properties of clayey soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(9): 1740 - 1745. (in Chinese))
- [17] FAN Heng-hui, KONG Ling-wei. Empirical equation for evaluating the dispersivity of cohesive soil[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2013, **50**(9): 989 - 994.