

DOI: 10.11779/CJGE201907019

不同掺砾量下砾石土抗拉强度试验研究

吉恩跃^{1, 2, 3}, 陈生水^{1, 2}, 朱俊高³, 傅中志^{1, 2}

(1. 南京水利科学研究院岩土工程研究所, 江苏南京 210024; 2. 水利部土石坝破坏机理与防控技术重点实验室, 江苏南京 210029;
3. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏南京 210024)

摘要: 砾石土的抗拉强度是土心墙堆石坝抵抗拉裂破坏的重要指标之一。基于自主研制的单向拉伸试验模具, 对不同掺砾量下的砾石土进行了系列的单向拉伸试验。在此基础上得到了以下结论: 在本文的试验参数范围内, 砾石土的抗拉强度随着含水率的增大而减小, 随着干密度的增大而增大; 分别给出了各掺砾量下土样抗拉强度与其最优含水率及最大干密度的关系表达式; 对于处于各自最优含水率和最大干密度下的砾石土, 掺砾量从0%增加到50%时, 试样的抗拉强度从122.6 kPa减小到了49.8 kPa, 且两者呈线性递减关系; 试样的峰值拉应变和极限拉应变均随着掺砾量的增加而线性递减; 对不同掺砾量土样的断裂能分析发现, 随着掺砾量的增加, 土样的抗拉能力不断减弱; 在略高于最优含水率及处于最大干密度时砾石土试样的综合抗拉能力最强。相关试验成果可为实际土石坝心墙抗裂设计提供参照。

关键词: 砾石土; 掺砾量; 单向拉伸; 抗拉强度; 拉应变

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2019)07-1339-06

作者简介: 吉恩跃(1989—), 男, 江苏盐城人, 博士后, 主要从事土石坝工程、粗颗粒土基本性质及本构关系研究。
E-mail: eyji@nhri.cn。

Experimental research on tensile strength of gravelly soil under different gravel contents

JI En-yue^{1, 2, 3}, CHEN Sheng-shui^{1, 2}, ZHU Jun-gao³, FU Zhong-zhi^{1, 2}

(1. Geotechnical Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China; 2. Key Laboratory of Earth-Rock Dam Failure Mechanism and Safety Control Techniques, Ministry of Water Resources, Nanjing 210029, China; 3. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The tensile strength of gravelly soil is one of the important indexes for resisting the cracking of earth core rockfill dams. Based on the self-developed uniaxial tensile test mould, a series of uniaxial tensile tests are carried out on the gravel soil with different gravel contents. Within the range of test parameters, the tensile strength of gravelly soil decreases with the increasing water content and increases with the increase of dry density. The relationship of tensile strength versus the optimum water content and the maximum dry density is presented, respectively. For the gravelly soil with the optimum water content and maximum dry density, as the gravel content increases from 0% to 50%, the tensile strength of specimens decreases from 122.6 kPa to 49.8 kPa linearly. The peak tensile strain and ultimate tensile strain both decrease with the increase of the gravel content. From the fracture energy analysis, it is found that the tensile capacity of gravelly soil decreases slightly with the increase of the gravel content. In the case that the specimens with the maximum dry density and the water content higher than the optimum water content, the comprehensive tensile capacity of the specimens is the strongest. The relevant test results can provide support for the anti-crack design of high earth and rockfill dams.

Key words: gravelly soil; gravel content; uniaxial tensile test; tensile strength; tensile strain

0 引言

中国高土石坝分布广泛, 其中土质心墙坝因其出色的协调变形能力被广泛应用于不良地质情况。通常, 为了增加土质心墙的模量, 常常在黏土中掺入一定比例的砾石(砾石土)作为心墙的筑坝料, 以减小与堆石区模量的差异, 达到减小拱效应的目的。随着砾石

含量的增大, 土体抵抗剪切变形的能力显著增大, 但其抗裂性能是否仍能满足坝体的抗裂设计要求值得深

基金项目: 国家重点研发计划重点专项项目(2017YFC0404806); 国家自然科学基金项目(51809182, 51779152); 中国博士后科学基金项目(2018M630578); 中国博士后科学基金特别项目(2019T120444)
收稿日期: 2018-07-12

入研究。

目前,学者们^[1-3]针对黏土进行了大量的单轴、三轴拉伸试验,得到了抗拉强度及拉应变随含水率、干密度以及基质吸力等的定量变化规律。另外,一些学者针对特殊土展开了系列抗拉试验研究,孙纬宇等^[4]研究了黄土的抗拉特性,指出原状黄土的抗拉强度范围为10.5~46.5 kPa。吕海波等^[5]通过试验证明膨胀性土的抗拉强度在饱和度约66%时达到最大,对应的含水率为最优含水率。路立娜等^[6]对分散性土抗拉强度及断裂机理进行了系统的分析,认为长径比取2.5,拉伸速率取1.8 mm/min可有效避免端部效应及自重影响。Divya等^[7]利用自行研制的模具研究了加筋土的拉伸特性,利用图像测量技术研究了加筋土微观力学特性,指出加筋率增加到0.75%后,加筋土抗拉强度可增加2.5倍。Tang等^[8]研制了一种拉伸模具,试样在模具内制完成后不需拆卸,可直接进行拉伸试验。并利用该模具,对人工加筋黏土进行了不同含水率及干密度的拉伸试验。张辉等^[9]进行了不同干密度及含水率下击实砾质土抗拉强度试验,试样通过上下夹具来锚固,基于该试验仪器,朱俊高等^[10]研究了3种砾石土在不同击实功、饱和度、含水率下抗拉强度的变化规律。总的来说,目前对砾石土的拉伸特性研究较少,对掺砾量影响其抗拉能力的认知尚不足。

本文通过自主研制的拉伸模具进行了不同掺砾量、不同含水率、不同干密度下的砾石土单向拉伸试验,研究了不同方案下砾石土的抗拉强度、极限拉伸应变、断裂能等参数随掺砾量的变化规律。

1 单向拉伸模具的研制

目前应用较多的单轴拉伸试验装置,其主要的缺陷在于:①对于长方形或圆柱形等规则的试样,由于试样是靠夹具与土体之间的摩擦力来提供约束力的,过小的夹力不能有效的夹住试样;而过大的夹力会使试样两端土体发生压缩变形。②对于低密度、高含水率的黏性土或者砾石土,如使用环氧树脂黏结试样与加载板,试样会在黏结区内拉裂破坏。③对于沙漏型的试样,模具对内部土体的存在一定的约束作用,这部分约束力对土体的抗拉能力有一定的贡献。④卧式拉伸装置中试样与试验平台是直接接触的,存在一定的摩擦力,尽管在试样与平台之间采用滑轨,很难保证土体在拉伸时不被滑轮扰动剥落。

针对前人所研制的拉伸装置的弊端,本试验拟采用一种新型单轴拉伸装置。该装置将试样两端的加载段与中间的拉伸段分开设计成不同的形状。

单轴拉伸试样的拉伸段采用长方体的形式,为了满足最大粒径的限制,尺寸设为10 cm×10 cm;加载

段土样均采用四方体形式,其横断面为梯形形状,两侧装置和加载面夹角设置为30°;为了方便两端拉应力的施加,在哑铃状模具两侧设置挂耳,其尺寸与万能试验机自带的挂钩相匹配,两者通过铆钉链接。

另外,为尽量减小加载段与拉伸段土体之间由于形状各异而出现的应力集中问题,在二者间的连接部位设置了圆弧状铝皮来成型过渡段的土样。中间段和两侧梯形段以及上部和下部的装置通过六角螺栓连接,拆卸较为方便。该装置集制样、试验于一体,不需要其他复杂的设备。图1详细给出了本文拉伸装置的具体形状及尺寸。

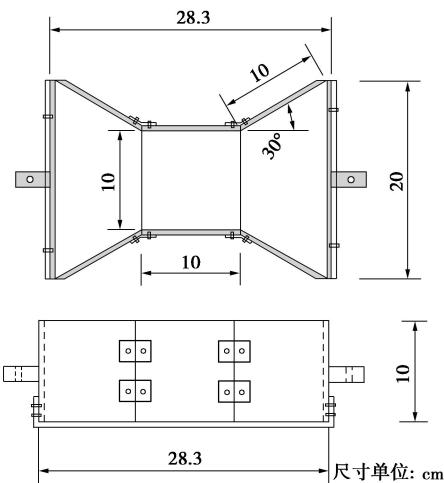


图1 本文所用拉伸装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of tensile device

制样完成后,将整个试样连同模具竖直安装在万能试验机上,采用试验机自带的力及位移传感器测试试样拉力及拉伸位移,最大试验力为1 kN,精度不大于±1.0%。试验完成后将试样被拉断的上半部分连同上半部分模具移至电子秤,测量并记录其自重,从最大拉力中减去试样拉断上部分自重,并换算成拉应力,即为试样的抗拉强度。

2 试验土料及试验方案

2.1 试验土料

本文试验所用的黏性土来自某心墙堆石坝心墙混合料,采用筛析法及密度计法对混合料进行颗粒分析,得到其颗粒曲线如图2所示。

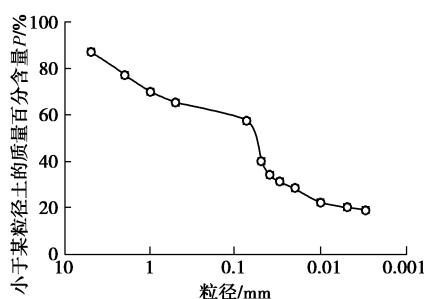


图2 试验所用心墙料颗粒曲线

Fig. 2 Gradation curve of core materials

依据土工试验规程, 对该黏土进行基本试验得到其基本参数指标见表 1 所示。

表 1 某土石坝心墙料基本参数

Table 1 Basic parameters of core materials

土粒相对密度 G_s	液限 $w_L/\%$	塑限 $w_p/\%$	塑性指数 I_p	天然含水率/%	渗透系数 $k/(cm \cdot s^{-1})$
2.74	30.4	20.5	10	22.2	2.0×10^{-6}

试验所用砾石土中的砾石取自某土石坝堆石料, 母岩为花岗岩。经人工破碎及筛分得到试验需要的粒组, 因装置中部尺寸为 $10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$, 根据土工试验规程的规定, 控制砾石最大粒径为 20 mm (试样最长边的 $1/5$), 最小粒径则控制为 2 mm 。

2.2 试验方案

首先对不同掺砾量下的砾石土进行击实试验, 确定其最大干密度及最优含水率。表 2 给出了不同掺砾量下的最优含水率和最大干密度具体数值, 后文试样的制备均按照表 2 中的最优含水率和最大干密度作为控制标准。

表 2 掺砾量为 0%~50%下砾石土最优含水率和最大干密度

Table 2 Optimum water contents and maximum dry densities of gravel content from 0%~50%

掺砾量/%	0	10	20	30	40	50
最优含水率/%	17.5	16.4	14.8	13.3	11.5	10.1
最大干密度/ $(g \cdot cm^{-3})$	1.73	1.82	1.88	1.98	2.01	2.05

本试验主要研究干密度、含水率及掺砾量对砾石土抗拉强度的影响, 采用控制变量方法拟定试验方案, 具体的试验方案如表 3 所示, 试验共计 30 个试样。

表 3 砾石土单向拉伸试验方案

Table 3 Tensile test schemes of gravelly soil

类别	掺砾量/%	干密度/ $(g \cdot cm^{-3})$	含水率/%
纯黏土	0	1.73 1.73, 1.63, 1.53	17.5, 15.5, 19.5 17.5
	10	1.82 1.82, 1.72, 1.62	16.4, 14.4, 18.4 16.4
	20	1.88 1.88, 1.78, 1.68	14.8, 12.8, 16.8 14.8
	30	1.98 1.88, 1.78, 1.68	13.3, 11.3, 15.3 13.3
	40	2.01 2.01, 1.91, 1.81	11.5, 9.5, 13.5 11.5
	50	2.05 2.05, 1.95, 1.85	10.1, 8.1, 12.1 10.1

3 试验结果分析

3.1 变含水率试验成果及分析

砾石土试样在加载初期近似发生均匀变形, 此时可认为试样各断面变形是相同的, 在试样达到其极限抗拉强度之后, 出现宏观的细微裂缝, 即断裂区域。断裂区域内部的变形加速发展, 而其他区域的土体则发生回弹变形, 应变减小, 出现卸载现象。在达到极

限拉应力后, 拉伸试验测得的是未开裂区域和断裂区域的总位移。而只有断裂区域的土体应力应变关系才能真实反应其拉伸状态下应力应变全过程, 因此必须要对应力变形曲线进行分段处理才能得到断裂区域真实的应力应变曲线, 本文借鉴了李全明^[12]提出的压实黏土在受拉过程中应力应变曲线的整理方法。

图 3 给出了不同掺砾量、最大干密度下不同含水率砾石土拉应力应变关系曲线。可以看出, 随着含水率的增加, 各方案的抗拉强度降低显著; 发生拉裂时所需的拉应变随着含水率的增加而增加。本试验所有土样均处于非饱和状态, 前人对非饱和土的研究表明基质吸力随着含水率的增大而减小^[11]。随着含水率的增大, 土体中的毛细管逐渐被重力水所充满, 土颗粒之间由于毛细作用力而形成的表面张力逐渐减弱, 基质吸力降低, 土颗粒之间的宏观黏聚力降低, 导致土样的抗拉强度降低。

另一方面, 在含水率较低时, 曲线的初始切线模量较大, 非线性特征不是很明显。相反, 在含水率较高时, 试样的初始切线模量较小, 曲线的非线性特性显著, 超过峰值应力后, 在发生拉伸破坏过程中, 有明显的软化特征, 且随着掺砾量的增大, 软化特征越来越明显。

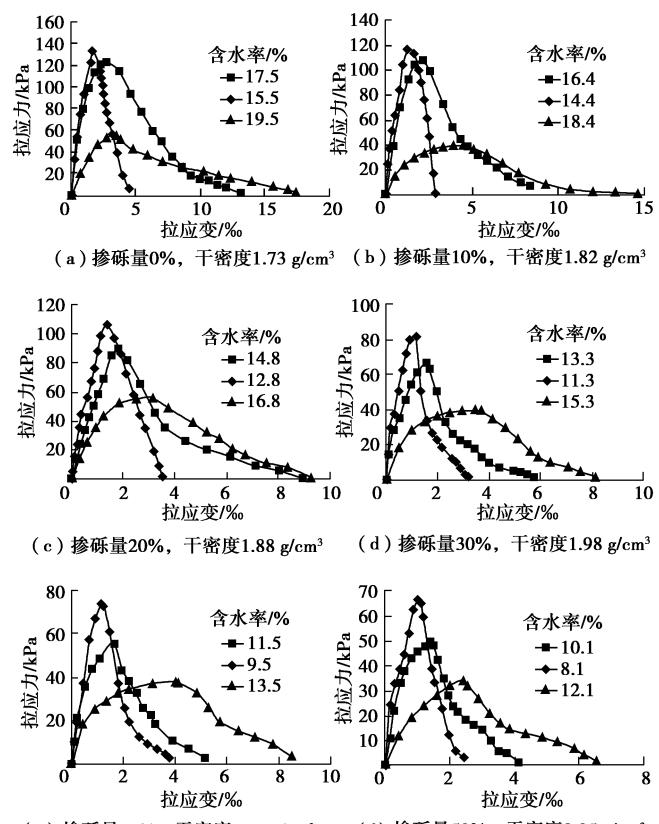


图 3 各掺砾量、最大干密度下不同含水率砾石土拉应力应变关系曲线

Fig. 3 Tensile stress-strain curves of gravelly soil with different water contents under different gravel contents and maximum dry densities

为进一步分析各掺砾量下砾石土含水率与抗拉强度的关系,图4给出了掺砾量从0%~50%下砾石土抗拉强度随着含水率变化曲线,其中制样干密度均为各掺砾量下击实试验求得的最大干密度。可以看出,不同掺砾量下的试样抗拉强度都随含水率的增大而减小。在掺砾量较小时,含水率与抗拉强度的关系曲线呈较好的线性变化,而当掺砾量增加到30%后,含水率和抗拉强度转为非线性关系。可以预见,当含水率降低到某值后抗拉强度会出现峰值^[13],此后随着含水率降低,抗拉强度会急剧减小,本文只研究土样在最优含水率附近变化的情况,因此不作过多论述。

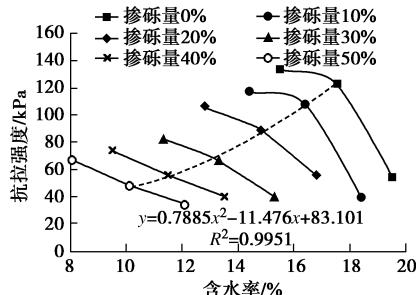


图4 不同掺砾量下抗拉强度随含水率变化曲线

Fig. 4 Variation of tensile strength with water content under different gravel contents

因黏粒含量较高时基质吸力对于试样含水率的变化较为敏感,当试样掺砾量较小时,土样抗拉强度变化幅度较大;当掺砾量较大时,试样中相应的黏粒含量较低,此时抗拉强度整体偏小,抗拉强度对含水率的变化不是太敏感,如掺砾量为50%时,抗拉强度的浮动范围仅有约25 kPa。

实际土石坝工程中应控制上料含水率为最优含水率,在本文各掺砾量下砾石土的抗拉强度与其最优含水率呈较明显的非线性变化,可以表示为

$$\sigma_t = 0.7885w_{op}^2 - 11.476w_{op} + 83.1 \quad (1)$$

3.2 变干密度试验成果及分析

在保持试样含水率(最优含水率)不变的情况下减小试样干密度,可以看出,对于所有掺砾量的试样,最大干密度下其抗拉强度最大,如图5所示。

随着干密度的降低,土样抗拉强度显著降低,各掺砾量下的试样从最大干密度降低到低干密度后,试样抗拉强度均降低了约其最大抗拉强度的1/2。主要的原因是:在低干密度的条件下,对抗拉强度起决定性的是土颗粒间的凝聚力,随着颗粒间的孔隙逐渐被挤压密实,凝聚力增大趋势减小,抵抗拉应力的主导作用变为颗粒之间的分子力。随着干密度的进一步增加,土体孔隙的半径越小,弯液面的曲率越大,基质吸力越大,进而使得抗拉强度变大。

对于所有试验方案,拉伸破坏时所需的极限拉应变及总拉应变随干密度的降低而降低。此外,随着干

密度的降低,土样的初始模量降低,极限拉伸强度后的曲线下降段的斜率略有增大,软化特征较密度大的试样不明显。

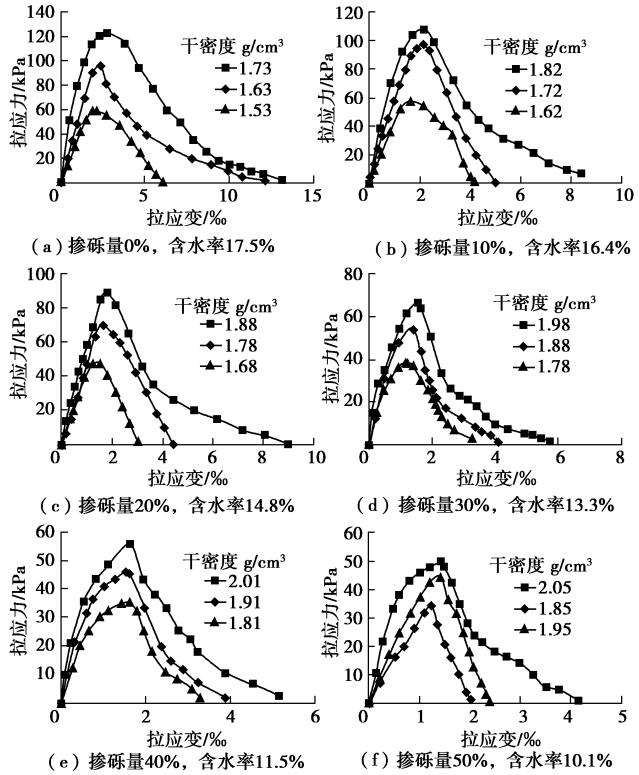


图5 各掺砾量、最优含水率下不同干密度砾石土拉应力应变关系曲线

Fig. 5 Tensile stress-strain curves of gravelly soil with different maximum dry densities under different gravel contents and optimum water contents

为进一步分析不同掺砾量下干密度与抗拉强度的关系,图6给出了5种掺砾量下3个干密度和抗拉强度关系曲线。可以看出各掺砾量下随着干密度的降低,抗拉强度也随之减小,掺砾量越大,试样黏粒含量越低,因此其抗拉强度减小程度越小。各个掺砾量及最大干密度下掺砾料的抗拉强度和最大干密度呈较好的线性关系,可表示为

$$\sigma_t = -239.91\rho_{dm} + 536.68 \quad (2)$$

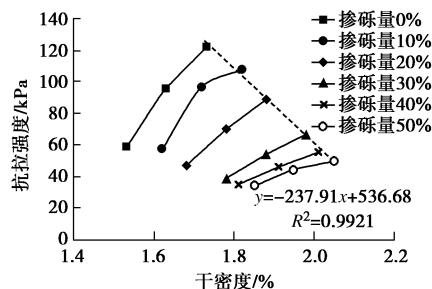


图6 不同掺砾量下抗拉强度随干密度变化曲线

Fig. 6 Variation of tensile strength with dry density under different gravel contents

随着掺砾量的增大,抗拉强度随着干密度的降低的程度在减小。如掺砾量为0%时,干密度从1.73 g/cm³

减小到 1.53 g/cm^3 , 抗拉强度从 122.6 kPa 减小到 59.2 kPa , 减小了 63.4 kPa ; 掺砾量为 50%时, 干密度从 2.05 g/cm^3 减小到 1.95 g/cm^3 , 抗拉强度从 49.8 kPa 减小到 34.3 kPa , 仅减小了 15.5 kPa 。主要的原因是掺砾量增大到一定值时, 黏粒含量已较小, 通过减小其干密度测得的抗拉强度变化值浮动不大。

3.3 掺砾量对砾石土抗拉强度影响分析

上文提到, 土体的抗拉强度主要是由黏粒的相对密度所主导, 掺砾量增加时, 土样的黏粒含量会减小, 如掺砾量增加到 100%, 除了存在部分颗粒间的咬合力及摩擦力, 土样的抗拉强度基本接近 0。图 7 给出了不同掺砾量下土样的抗拉强度值。可以看出掺砾量从 0% 增加到 50% 时, 抗拉强度从 122.6 kPa 减小到 49.8 kPa , 两者满足一定的线性关系:

$$\sigma_t = -1.5741\lambda + 120.96 \quad (3)$$

式中, λ 为掺砾量。考虑到心墙既要满足一定的刚度又要满足一定的防渗要求, 实际土石坝工程中, 通常将心墙的掺砾量控制在约 35% 左右, 同时控制其最优含水率和最大干密度作为施工参数。按照式 (3), 掺砾量在 35% 时, 掺砾料的抗拉强度约为 65.9 kPa 。

按照此趋势, 掺砾量增加到 80% 时, 土样的抗拉强度为 0。事实上, 掺砾量增大到一定的值后, 部分黏粒会被砾石架空, 基质吸力提供的抗拉强度占一部分, 还有一部分是粗颗粒土之间的咬合力, 当然由于土样比较难以成型, 其抗拉强度较难通过试验测得。

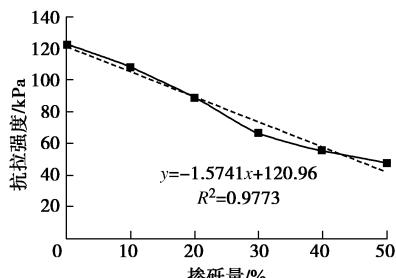


图 7 抗拉强度随掺砾量变化曲线

Fig. 7 Variation of tensile strength with gravel content

3.4 断裂能及拉应变分析

表 4 给出了各方案土样断裂能及拉应变的具体数值, 其中断裂能由各掺砾量下试样的拉伸应力应变曲线所围面积计算得到。可以看出, 砾量为 0% 的土样在含水率为 17.5% (最优含水率) 时抗拉强度达到 122.5 kPa , 相应的断裂能达到最大值 14.3 N/m ; 随着掺砾量的增加, 土样断裂能均是在比最优含水率多 2% 时达到其最大值。也就表明掺砾含量较高的砾石土并不是在其最优含水率时达到其最大抵抗拉裂变形的能力, 而是在比最优含水率略大。说明, 实际施工中控制心墙上料含水率略高于最优含水率有利于抵抗不均匀变形, 降低裂缝发生的可能性。

另一方面, 各掺砾量下的土样均在其最大干密度时达到断裂能的最大值, 说明较大的压实度下土料的抵抗拉裂变形的能力较强, 实际施工中严格控制压实标准是提高防渗体抗拉裂能力的有效措施。

表 4 各方案砾石土断裂能及拉应变

Table 4 Fracture energies and tensile strains of gravelly soil under different test schemes

土样类别	掺砾量/%	干密度/(g·cm ⁻³)	含水率/%	极限&峰值拉应变/%	断裂能/(N·m ⁻¹)
纯黏土	0	1.73	17.5	13.1/2.7	14.3
			15.5	4.5/1.7	6.6
			19.5	17.5/3.5	9.5
	10	1.82	16.4	8.9/2.2	10.0
			14.4	3.9/1.3	4.4
			18.4	14.5/4.1	6.6
	20	1.88	14.8	8.8/1.9	6.3
			12.8	3.5/1.4	4.5
			16.8	9.3/3.1	6.9
	30	1.98	13.3	5.7/1.6	5.2
			11.3	3.2/1.2	3.5
			15.3	8.1/3.2	5.9
砾石土	40	2.01	11.5	5.1/1.6	4.9
			9.5	2.9/1.2	3.1
			13.5	8.5/3.9	5.6
	50	2.05	10.1	4.1/1.4	3.5
			8.1	3.0/1.0	2.8
			12.1	6.5/2.4	4.0

为研究掺砾量对断裂能的影响, 图 8 给出了掺砾量和断裂能的关系曲线, 其中断裂能均是由各掺砾量下的最优含水率和最大干密度下计算而得。可以看出随着掺砾量的增加, 断裂能减小的较为明显, 在掺砾量为 25%~40% 时, 断裂能的减小不是很明显, 掺砾量增加到 40% 后, 断裂能的减小幅度又开始变大, 掺砾量到 50% 时, 断裂能仅有 3.5 N/m , 表明此时试样拉裂所需能量已很小。此过程主要是由于试样内砾石的含量变大, 拉裂面上的黏土与砾石作用面在扩大, 相应的黏土颗粒间的作用力在减小, 因此基质吸力在不断减小, 则土样拉伸破坏所需要的总能量在减小, 宏观上体现为断裂时需要的拉应力和拉应变在减小。

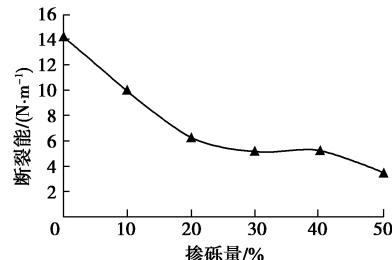


图 8 掺砾量和断裂能关系曲线

Fig. 8 Variation of gravel content with fracture energy

图 9 给出了掺砾量和拉应变关系曲线, 可以看出随着掺砾量的增加, 土样的极限拉应变及峰值拉应变均呈减小趋势, 且满足一定的线性关系, 说明掺砾量的增加会减小砾石土抵抗塑性变形的能力。

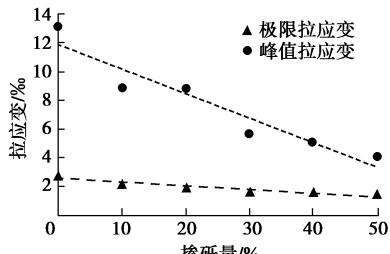


图 9 掺砾量和拉应变关系曲线

Fig. 9 Variation of gravel content with tensile strain

4 结 论

本文基于自行研制的单向拉伸试验模具，采用不同掺砾量的砾石土进行了系列的轴向拉伸试验。讨论了抗拉强度、断裂能、拉应变等参数随着土体掺砾量、含水率及干密度变化的规律，得到以下 3 点结论。

(1) 在本文的试验参数范围内，砾石土的抗拉强度随着含水率的增大而减小；随着干密度的增大而增大。掺砾量为 30% 时，含水率的增加使得土样抗拉强度从 81.8 kPa 减小到 39.8 kPa；干密度的减小使得其抗拉强度从 66.6 kPa 减小到 38.5 kPa。

(2) 对于掺砾量不同的砾石土，在各自最优含水率和最大干密度下，试样的抗拉强度随着掺砾量的增加而呈线性递减趋势；试样的峰值拉应变和极限拉应变均随着掺砾量的增加而减小。

(3) 对不同掺砾量土样的断裂能分析发现，在略高于最优含水率及处于最大干密度时其综合抗拉能力最强；随着掺砾量的增加，土样的抗拉能力不断减弱。

参考文献：

- [1] 钮泽明, 陆士强. 黏性填土单轴抗拉强度的几个影响因素[J]. 岩土工程学报, 1983, 5(2): 35 - 44. (NIU Ze-ming, LU Shi-qiang. On some factors influencing the uniaxial tensile strength of cohesive compacted fill[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1983, 5(2): 35 - 44. (in Chinese))
- [2] 陈梦芸. 击实黏土抗拉强度研究[D]. 南京: 南京大学, 2014. (CHEN Meng-yun. Study on tensile strength of compacted clay[D]. Nanjing: Nanjing University, 2014. (in Chinese))
- [3] TANG G X, GRAHAM J. A method for testing tensile strength in unsaturated soils[J]. Geotechnical Testing Journal, 2000, 23(3): 377 - 382.
- [4] 孙纬宇, 梁庆国, 欧尔峰, 等. 陕西延安 Q2 原状与重塑黄土抗拉强度对比试验研究[J]. 土木工程学报, 2015, 48(增刊 2): 53 - 58. (SUN Wei-yu, LIANG Qing-guo, OU Er-feng, et al. Comparative experimental study on tensile strength of undisturbed and remolded Q2 loess from Yan'an Shanxi, China[J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 48(S2): 53 - 58. (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 - 620. (LÜ Hai-bo, ZENG Zhao-tian, GE Ruo-dong, et al. Experimental study of tensile strength of swell-shrink soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(3): 615 - 620. (in Chinese))
- [6] 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 Heng-hui, 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))
- [7] DIVYA P V, VISWANADHAM B V S, GOURC J P. Evaluation of tensile strength-strain characteristics of fiber-reinforced soil through laboratory tests[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2013, 26(1): 14 - 23.
- [8] TANG C S, WANG D Y, CUI Y J, et al. Tensile strength of fiber-reinforced soil[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2016, 28(7): 4016031.
- [9] 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 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(S2): 4186 - 4190. (in Chinese))
- [10] 朱俊高, 梁彬, 陈秀鸣, 等. 击实土单轴抗拉强度试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2007(2): 186 - 190. (ZHU Jun-gao, LIANG Bin, CHEN Xiu-ming, et al. Experimental study on uniaxial tensile strength of compacted soils[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2007(2): 186 - 190. (in Chinese))
- [11] 张鹏程, 汤连生, 姜力群, 等. 基质吸力与含水量及干密度定量关系研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(增刊 1): 2792 - 2797. (ZHANG Peng-cheng, TANG Lian-sheng, QIANG Li-qun, et al. research of quantitative relations of matric suction with water content and dry density[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(S1): 2792 - 2797. (in Chinese))
- [12] 李全明. 高土石坝水力劈裂发生的物理机制研究及数值仿真[D]. 北京: 清华大学, 2016. (LI Quan-ming. Physical mechanism and numerical simulation of hydraulic fracturing in high earth and Rockfill dam[D]. Beijing: Tsinghua University, 2016. (in Chinese))
- [13] VANICEK I. The importance of tensile strength in geotechnical engineering[J]. Acta Geotechnica Slovenica, 2013(1): 5 - 17.