

击实土单轴抗拉强度试验研究

朱俊高¹, 梁 彬¹, 陈秀鸣¹, 曹 荣²

(1. 河海大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210098; 2. 成都勘测设计研究院, 四川 成都 610072)

摘要 黏性土体内的裂缝产生与其抗拉强度有关. 在分析土石坝心墙水力劈裂、地基裂缝等问题时, 考虑抗拉强度对深入研究土体应力变形特性有重要意义. 对 3 种不同土料的击实试样进行了抗拉强度试验, 其中, 1 种土料为塑性相对较高的黏土, 另 2 种为砾质黏土. 通过试验, 研究了各种土料在不同击实功、试样由非饱和变化到饱和状态、不同制样含水率时的抗拉强度. 结果表明, 黏性土的抗拉强度随着击实功的增大而增大. 试样由非饱和变化到饱和状态后, 其抗拉强度大幅降低. 在同一击实功下, 土体的抗拉强度随着制样含水率的增加而减小.

关键词 砾质黏土 抗拉强度 含水率 非饱和

中图分类号 :TU411

文献标识码 :A

文章编号 :1000-1980(2007)02-0186-05

黏性土的抗拉强度数值相对较小, 因此大多数情况下不必考虑, 只是作为安全储备. 但在有些情况下, 如作为理论或机理研究, 需要考虑黏性土的抗拉强度.

土石坝心墙开裂问题、公路路基的裂缝变形等结构物或地基的设计需要对土体尤其是击实黏土的抗拉强度有一定程度的了解. 近十多年来, 我国高土石坝发展迅速, 对水力劈裂的判定提出了更高要求. 裂缝或水力劈裂不仅可能引起渗漏, 影响工程的正常运行, 甚至可能危及大坝安全. 因此, 对土体抗拉特性的认识和抗拉强度的研究具有重要意义.

目前虽有一些学者^[1-6]对土体抗拉强度进行过相关研究, 但对土体抗拉强度的认识还不很成熟, 抗拉强度的试验设备也不够完善. 李广信等^[1]研制了一套简单的单向水平拉伸试验装置, 荷载通过砝码逐级施加, 试样为长方体. 张小江等^[2]研制了一套单轴静动力拉压试验仪, 通过应力控制来加载, 试样为长方体. 马芹永^[3]介绍了一种日本单轴拉伸试验仪, 试样为圆柱体. 邢义川等^[4]设计了一套简单的单轴抗拉试验仪, 通过砝码逐级加载来测定原状黄土和扰动黄土的抗拉强度, 试样为长方体. 党进谦等^[5-6]在原有直剪仪的基础上研制了一套卧式单轴土工应变拉伸仪, 仪器通过手轮转动来控制施加荷载的速率, 试样为长方体. 这些学者所研究的土料为纤维加筋土、冻土、黄土等. 对于高土石坝心墙料的砾质黏土, 其抗拉强度的研究还比较少.

本文采用笔者新近设计的土体单轴拉伸试验夹具对 3 种不同土料进行了不同击实功、试样从非饱和变化到饱和状态、不同含水率下的单轴抗拉试验, 研究了不同情况下各种土料抗拉强度的大小.

1 试验仪器与试验土料

本文设计了一套能进行土体单轴拉伸试验的夹具, 如图 1 所示. 上夹具和下夹具均为 2 片半圆的圆柱片, 内径 61.8 mm, 可夹住直径 61.8 mm 的圆柱体试样. 该夹具包括 1 个力转换横梁、1 根传力杆、上下夹具各 1 个和 1 个底座. 夹具的夹头长度较长, 为 40 mm, 可夹住试样两端的长度各为 40 mm, 能保证在尽量小的径向夹力的作用下获得足够大的摩擦力. 该夹具安装于万能试验机上, 通过控制万能试验机进行应力或应变控制加载.

这套夹具的优点是简单且使用方便, 但有一个缺陷, 即试验过程中夹具与试样之间可能会打滑, 因此, 只适用于研究抗拉强度的大小, 不宜用于研究抗拉变形性质.

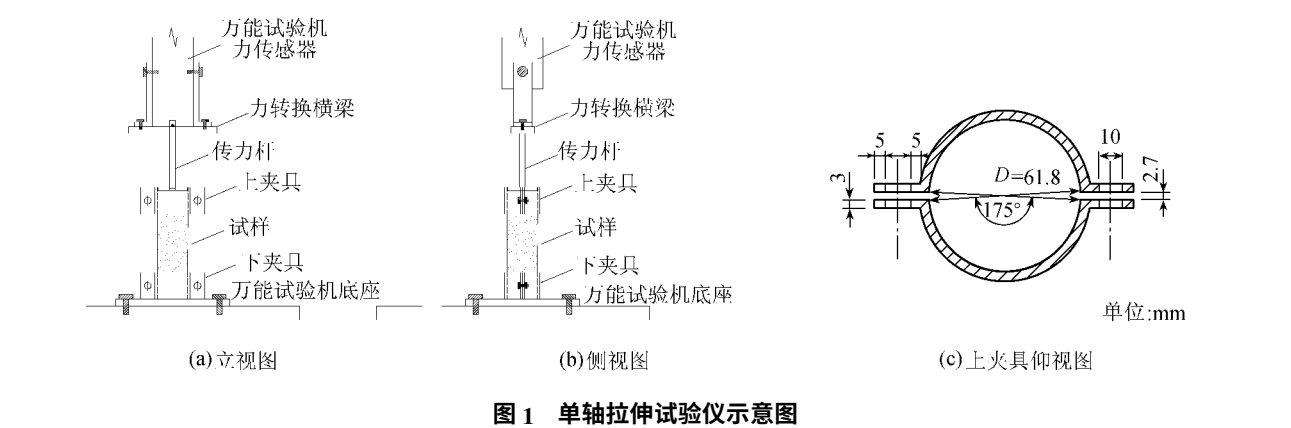


图 1 单轴拉伸试验仪示意图

Fig.1 Sketch of experimental instrument for uniaxial tensile test

本文试验研究所用 3 种不同的土来自于某心墙堆石坝的心墙料,即 B 区土、D 区土和塑性黏土,其中,B 区土料和 D 区土料含有砾.由于试样尺寸的限制,试验前,将土样过 5 mm 筛,剔除直径大于 5 mm 颗粒.剔除粗粒后各土料的颗分试验曲线如图 2 所示.3 种土料的主要指标见表 1.

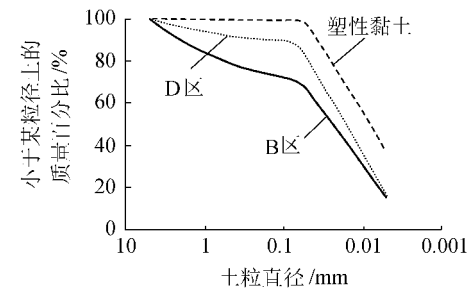


图 2 试验土料颗分曲线

Fig.2 Gradation curve for soil specimens

表 1 试验土料的主要物理指标

Table 1 Physical index for soil specimens

土类	土粒相对密度	液限/%	塑限/%	塑性指数
B 区土	2.72	31.9	20.7	11
D 区土	2.68	31.6	20.3	11
塑性黏土	2.68	36.5	20.7	16

进行抗拉强度试验的圆柱体试样尺寸为:高度 $h=150\text{ mm}$,直径 $D=61.8\text{ mm}$.在室内通过人工击实制备.

B 区土分别按 2 种不同击实功下的最大干密度和最优含水率制样,其中 B1 代表 B 区土在 604 kJ/m^3 击实功下的最大干密度试样,B2 代表 B 区土在 2740 kJ/m^3 击实功下的最大干密度试样.类似地,D 区土也分为 D1 和 D2 2 种不同的试样.对于塑性黏土,先进行击实试验(604 kJ/m^3 击实功),得到该土样的最优含水率为 20%,然后按照 20%,22%,23%,24%,25% 5 种不同的含水率以及击实曲线上这些含水率对应的干密度进行制样,分别用 P20,P22,P23,P24,P25 表示.

除了进行上述对应含水率(非饱和)情况下试样的抗拉强度试验外,对这 9 种(非饱和和击实)试样分别抽气饱和,制成饱和试样进行抗拉强度试验.

B 区、D 区土料对应的干密度和含水率分别为 B1 : 1.92 g/cm^3 , 12.8% ;B2 : 2.04 g/cm^3 , 10.7% ;D1 : 1.88 g/cm^3 , 13.5% ;D2 : 2.05 g/cm^3 , 11.5% .塑性黏土采用的 5 种制样干密度分别为 1.70 g/cm^3 , 1.68 g/cm^3 , 1.64 g/cm^3 , 1.62 g/cm^3 , 1.58 g/cm^3 , 对应的含水率分别为 20%, 22%, 23%, 24%, 25% .对应 9 种干密度的试样在抽气真空饱和后,其饱和含水率分别约为 15.0%, 12.0%, 16.2%, 11.7%, 21.5%, 22.5%, 23.7%, 24.4%, 26.0% .上述饱和及非饱和试样均做 3~5 个平行试验.

试样制备分 7 层击实,每层土料击实后对其表面刮毛,然后再倒入下一层土料进行击实.击实制备的试样用保鲜膜包裹起来,在室温下放置 24 h 以上,使击实过程中产生的超静孔隙水(气)压力得到充分消散.对需饱和的试样,将其放置 24 h 后装入真空饱和装置中抽气 1 h,回水后置于水中 24 h 再进行试验.

本文试验以应变控制试样受拉,拉伸速率 0.01 mm/min .依据应力-应变曲线,拉应力达到峰值时,即认为试样被拉断,试样破坏.同时,测出最大拉力值,并测定试样拉断后断口上部分的自重.从最大拉力中减去该自重,换算成拉应力值,该值即抗拉强度.

2 试验结果及分析

2.1 击实功的影响

在某一击实功下,土体有其对应的最大干密度及最优含水率,不同的击实功则有不同的最大干密度及最

优含水率. 试验中用不同的击实功模拟了现场不同压实遍数或压实等级. 不同击实功下 B 区和 D 区土击实样的抗拉强度如表 2 所示. 由表 2 可见, 随着击实功的增加, 干密度增大, 同时抗拉强度也增加.

由表 2 还可以看出, 当击实功由 604 kJ/m^3 增加到 2740 kJ/m^3 时, 功增加到原来的 4.54 倍, B 区和 D 区土的最大干密度是原来的 1.06 ~ 1.13 倍, (最优含水率) 非饱和试样的抗拉强度增加到原来的 2.15 ~ 1.54 倍, 饱和试样抗拉强度的增幅与此相近. 干密度对抗拉强度的影响较显著, 但不同土体, 影响程度可能不同. 与击实功的增幅相比, 抗拉强度增加的幅度并不大. 要使抗拉强度增加 1 倍, 需要增加的功可能是几倍甚至更高.

表 2 不同击实功下的土体抗拉强度

Table 2 Tensile strength of soil specimens under different amounts of compaction work

击实功/ ($\text{kJ}\cdot\text{m}^{-3}$)	B 区土最大 干密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	B 区土平均抗拉强度/ kPa		D 区土最大 干密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	D 区土平均抗拉强度/ kPa	
		非饱和状态	饱和状态		非饱和状态	饱和状态
604	1.92	19.9	3.1	1.88	51.1	8.2
2740	2.04	42.8	9.1	2.05	78.5	9.3

2.2 含水率的影响

表 3 为非饱和状态与饱和状态时土体的平均抗拉强度. 定义强度损失率为试样非饱和状态到饱和状态抗拉强度的差值与非饱和状态时抗拉强度之比. 由表 3 可以看出, 在各种情况中, 土体在由非饱和状态变化到饱和状态时, 其抗拉强度均有大幅降低, 9 种试样的平均强度损失率达 73.6%. 尽管不同土样其强度损失率大小有差异, 但总体都比较大.

表 3 非饱和与饱和状态时土体抗拉强度

Table 3 Tensile strength of soil specimens at unsaturated and saturated states

制样	含水率/%	饱和含水率/%	非饱和平均 抗拉强度/ kPa	饱和平均 抗拉强度/ kPa	饱和抗拉强度: 非饱和抗拉 强度/%	强度损失 率/%
B1	12.8	15.0	19.9	3.1	15.6	84.4
B2	10.7	12.0	42.8	9.1	21.3	78.7
D1	13.5	16.2	51.1	8.2	16.0	84.0
D2	11.5	11.7	78.5	9.3	11.8	88.2
P20	20.0	21.8	28.7	10.1	35.2	64.8
P22	22.0	22.5	31.9	6.0	18.8	81.2
P23	23.0	23.9	18.5	4.3	23.2	76.8
P24	24.0	24.7	10.3	8.0	77.7	22.3
P25	25.0	26.3	8.8	3.9	44.3	55.7

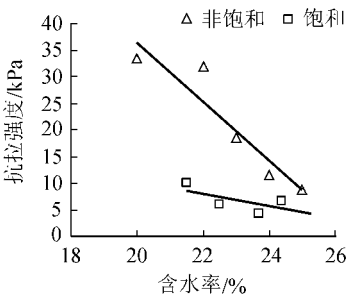


图 3 塑性黏土 604 kJ/m^3 击实功下
抗拉强度与含水率关系

Fig.3 Relationship between tensile strength
and moisture content of plastic clay under
compaction work 604 kJ/m^3

图 3 给出了同一击实功下塑性黏土饱和及非饱和状态下试样的抗拉强度随制样含水率的变化关系. 由图 3 可以看出, 同一击实功下, 土体的抗拉强度随着制样含水率的增加而减小. 在非饱和状态时, 减小的幅度较明显, 在试验的含水率范围内减幅达 74%. 而饱和状态时减幅小些, 但也达到 61%.

从图 3 还可以看出, 在制样含水率较小时, 试样由非饱和状态变化到饱和状态后, 其强度减小的幅度非常显著. 相反, 制样含水率高, 非饱和与饱和试样抗拉强度的差异相对小些.

抗拉强度随含水率 (大于最优含水率) 的增加而减小的原因可以解释为: (a) 对于非饱和土体, 其基质吸力随含水率的增加而减小, 所以其抗拉强度也随之减小; 反之, 随着含水率的降低, 抗拉强度增加. (b) 含水率增大, 土颗粒周围的结合水厚度变厚, 土颗粒间距增大, 这时通过公共结合水膜的水胶联结逐渐减弱, 凝聚力相应减小. (c) 颗粒间水量的增多也起到了润滑的作用, 使得土颗粒间的摩擦力相应减小.

另外, 试验前, 击实制备的试样在饱和器内浸水饱和后, 由于饱和器在径向的限制, 试样会沿长度方向伸长约 1 mm , 这也说明饱和后试样体积增大, 从而使土颗粒间距变大, 抗拉强度损失.

本文只做了塑性黏土的含水率大于最优含水率的试验, 结果与余湘娟^[7]的结论一致. 余湘娟还指出, 土的抗拉强度在小于最优含水率时随着含水率的增大而增大. 由于条件限制, 本文未能进一步试验验证. 但笔者认为, 在本文及文献^[7]的试验条件下, 试样所表现出的抗拉强度随含水率的关系并不能真正描述这两者间关系. 在这里, 试验的变化因素实际上有 2 个, 即密度和含水率. 张辉等^[8]研究表明, 在干密度不变的条件

下,含水率的影响是很有限的.在文献[8]的(某非饱和砾质土)含水率范围内,同一干密度条件下由于含水率变化而引起的抗拉强度变化幅度最大也只有 25%,对几种不同干密度条件,该变化幅值大多小于 10%.而本文的塑性非饱和黏土在 20%~25% 的含水率范围内,抗拉强度变幅达到了 278%,与此同时,试样干密度从 1.70 g/cm³ 变化到 1.58 g/cm³.因此,抗拉强度的变化在很大程度上还应该干密度变化的影响.故本文又整理了塑性黏土的抗拉强度与干密度关系,见图 4.图 4 及图 5 至少显示出现场碾压(即相对固定的击实功)条件下干密度或含水率的影响.

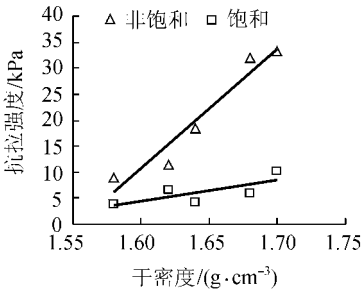


图 4 塑性黏土 604 kJ/m³ 击实功下干密度与抗拉强度关系

Fig.4 Relationship between dry density and tensile strength of plastic clay under compaction work 604 kJ/m³

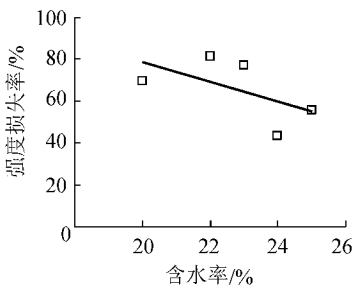


图 5 塑性黏土强度损失率与含水率关系

Fig.5 Relationship between percentage loss of tensile strength and moisture content of plastic clay

由表 3 可以看出,对于制样密度为最大干密度的试样,如 B1,B2,D1,D2,其强度损失率均在 85% 左右.对于塑性黏土,强度损失率随着制样含水率的增加而减小,如图 5 所示.

在试验过程中发现,试样破坏一般发生在击实分层处,说明虽然在制样过程中对分层面进行了刮毛处理,但分层处仍是薄弱面,这与击实制样的方向和拉伸方向有关.本文制样击实的方向是沿高度方向,其拉伸方向与分层面垂直,这种试样的试验只能用来模拟断裂或拉裂沿水平面的情况.如心墙土石坝的施工过程中,心墙的土是一层一层碾压形成的,存在水平分层面,由于心墙应力拱效应的作用,心墙可能会产生竖向拉应力.所以,这种试验应该是较好地模拟了心墙水平面受拉的情况.而对于水库大坝坝肩段的竖直裂缝、公路路基的裂缝等其他情况,裂缝与碾压层面垂直,这时,制备室内抗拉强度试验所用试样时,宜控制击实分层面与拉伸方向一致.

3 结 论

本文研制了一种简易的土体拉伸试验夹具,对 3 种土料进行了不同击实功、非饱和状态变化到饱和状态、不同含水率时的试样单轴抗拉强度试验,得到以下结论:

- a. 击实砾质黏土的抗拉强度随着击实功和干密度的增大而增大.对 B 区土,击实功提高 4.54 倍后,非饱和及饱和试样的抗拉强度提高 2~3 倍;D 区土抗拉强度提高 1.1~1.5 倍.
- b. 土体在由非饱和状态变化到饱和状态后,其抗拉强度显著减小,总体趋势是当非饱和试样含水率较小时,饱和后抗拉强度减小的幅度较大.
- c. 在同一击实功下,土体(塑性黏土)的抗拉强度随着制样(大于最优含水率时)含水率的增加而减小.在非饱和状态时,减小的幅度较明显,在试验的含水率范围内减幅达 74%.饱和状态时抗拉强度随含水率的减幅稍低,也达到 61%.实际上,这种抗拉强度的变化很大程度上有干密度变化的影响.
- d. 对不同碾压填土可能出现的受拉状态,在室内进行拉伸变形或强度试样时,宜根据情况选定拉伸方向与试样击实分层面平行或垂直.否则,可能与实际误差较大.

参考文献:

[1] 李广信,陈轮,郑继勤,等.纤维加筋黏性土的试验研究[J].水利学报,1995(6) 31-36.
[2] 张小江,周克骥,周景星.单轴静动拉压试验仪的研制和纤维加筋土断裂特性试验[J].大坝观测与土工测试,1997,21(4): 35-38.

[3] 马芹永.人工冻土单轴抗拉、抗压强度的试验研究[J].岩土力学,1996,17(3):76-81.
[4] 邢义川,骆亚生,李振.黄土的断裂破坏强度[J].水力发电学报,1999(4):37-44.
[5] 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(4):44-48.
[6] 党进谦,张伯平,熊永.单轴土工拉伸仪的研制[J].水利水电科技进展,2001,21(5):31-32.
[7] 余湘娟.黏土的拉裂试验及声发射检测[J].水利水电科技进展,1997,17(3):29-32.
[8] 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(S2):4186-4190.

Experimental study on uniaxial tensile strength of compacted soils

ZHU Jun-gao¹, LIANG Bin¹, CHEN Xiu-ming¹, CAO Rong²

(1. Geotechnical Research Institute of Hohai University, Nanjing 210098, China ;

2. Chengdu Hydroelectric Investigation & Design Institute of SPC, Chengdu 610072, China)

Abstract The cracks in cohesive soil are related to its tensile strength, therefore the consideration of tensile strength in analysis of hydraulic fracturing and foundation cracking of core walls of earth rockfill dams is of important significance to the overall research of stress deformation characteristics of soil body. Tensile strength tests were performed on three compacted soil specimens, one being the clay with relatively high plasticity, and the others being the gravel clay. The study of the tensile strength of the specimens under different compaction work and different moisture contents from unsaturated state to saturated state shows that the tensile strength of the specimens increases with the increase of compaction work, but decreases obviously as the specimens turn from the unsaturated state to the saturated state, and that the tensile strength of the specimens increases with the decrease of the moisture content under the same compaction work.

Key words gravel clay ; tensile strength ; moisture content ; unsaturation

全国中文核心期刊 中国科技核心期刊
全国水利系统优秀期刊 华东地区优秀期刊 江苏省优秀期刊
《水利水电科技进展》征订启事

(邮发代号 28-244,CN32-1439/TV,ISSN1006-7647,双月刊)

《水利水电科技进展》由河海大学主办,主要刊登与水科学、水工程、水资源、水环境等学科有关的科技论文,设有研究探讨、工程技术、水管理、专题综述、国外动态、科技简讯等栏目,适合与水科学、水工程、水资源、水环境等有关的科学研究人员、工程技术人员、科技管理人员以及大专院校师生阅读.

《水利水电科技进展》由邮局发行,邮发代号 28-244,2007 年每期定价 8 元,全年 6 期共计 48 元.读者亦可直接向编辑部订阅.欢迎个人和单位直接汇款订阅或函索订单.编辑部地址:210098 南京市西康路 1 号河海大学《水利水电科技进展》编辑部.联系电话 025-83786335,E-mail :jz@hhu.edu.cn,http ://kkb.hhu.edu.cn.汇款时务请注明“订水利水电科技进展”.