第33卷 第2期 石家庄铁道大学学报(自然科学版) Vol. 33 No. 2
2020年6月 Journal of Shijiazhuang Tiedao University(Natural Science Edition) Jun. 2020

甘肃定西Q3原状黄土抗拉强度研究

徐善常， 于鹏韬， 赵小芳， 张嫄园， 刁 璐

(天津大学 仁爱学院，天津 301636)

摘要：基于甘肃定西王家沟隧道原状黄土的竖直向和水平向取样，采用轴向劈裂试验探究原状黄土在各向异性的条件下与不同加载速率、不同加载圆柱直径、不同试样高度3方面的因素进行抗拉特性的分析。研究表明：原状黄土竖直向取样的抗拉性要优于水平向取样；在任意加载速率条件下，贯入深度与抗拉强度整体呈线性关系时抗拉强度越大；水平向试样的抗拉强度与加载圆柱的直径具有较强的线性关系；选试样高度为6～7 cm竖直向原状黄土研究抗拉特性较优。

关键词：原状黄土；抗拉强度；各向异性；加载速率；加载圆柱直径

中图分类号：TU411.3 **文献标志码**：A **文章编号**：2095-0373(2020)02-0039-07

0 引言

黄土是地球上分布广泛且性质又十分特殊的一种沉积物，早在《禹贡》一书有记载关于陕、甘一带的黄土分布和土质情况[1]。我国对于黄土的研究已经开展多年，在黄土的抗拉强度研究方面也有不少成果，骆亚生等[2]揭示了几项在黄土的单轴拉伸实验中较为明显的规律。孙超[3]采用单轴拉伸试验仪对黄土进行抗拉研究，通过电脑软件的控制减少了人为的误差。李春清等[4-5]研究了轴向劈裂试验因素对原状黄土抗拉强度影响规律，研究不同含水量和干密度时重塑黄土的抗拉强度特性。孙纬宇[6]对原状和重塑黄土进行了室内无侧限抗压和轴向压裂抗拉试验。胡志平等[7]控制应力、应变对压实黄土动力特性进行研究。张吾渝等[8]研究主应力对击实黄土强度和变形特性的影响。王军海等[9]采用动三轴试验对压实黄土动强度特性进行研究。王文胜[10]进行了浅埋大跨黄土隧道下穿公路方案比选。常立峰等[11]对大断面黄土隧道洞口段施工数值模拟分析。员康锋等[12]对晋南黄土结构性与湿陷性进行相关性研究。王辉等[13]对原状黄土及重塑黄土渗透特性进行试验研究。马林等[14]进行了平面应变与常规三轴实验下黄土的力学特性分析。

到目前为止，有关黄土的研究大多围绕着单一原状黄土的抗拉性质与影响因素或者原状与重塑黄土抗拉强度的对比研究开展的，对于原状黄土不同方向抗拉强度的对比研究相对较少。本文对甘肃兰州王家沟隧道原状黄土竖直向与水平向在不同加载速率、加载圆柱直径和试样高度下的抗拉强度进行试验。

1 试样制备和试验方法

1.1 试样来源

将用来试验的原状黄土土样按土工试验规程(SL237—1999)规定制出直径为61.8 mm、高度不等的竖直向与水平向圆柱试样数个，其基本物理性质如表1。

收稿日期：2019-02-18 **责任编辑**：车轩玉 DOI：10.13319/j.cnki.sjztddxxbzrb.20190025

基金项目：天津市大学生创新创业训练计划(201814038019，201814038012)；天津市高等学校提高创新能力引导项目(201814038019，201814038012)

作者简介：徐善常(1990—)，男，讲师，研究方向为岩土工程及土木工程。E-mail：xushanchangedu@163.com

徐善常，于鹏韬，赵小芳，等. 甘肃定西Q3原状黄土抗拉强度研究[J]. 石家庄铁道大学学报：自然科学版，2020，33(2)：39-45.

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表1 试验土样的物理指标

名称	密度/(g·cm^{-3})	含水率 ω/%	液限 ω_L/%	塑限 ω_P/%	塑性指数 I_P
王家沟原状土	1.72	24.67	32	26.65	5.35

1.2 试验方法

试验采用为轴向劈裂法,并利用应变控制式三轴仪进行试验。劈裂试验是在圆柱试件的直径方向上放入上下2根垫条,施加相对的线性荷载,使之沿试件直径向破坏,从而测得试件的抗拉强度,优点是操作简单,便于试验。轴向劈裂应力公式按照文献[4]所述计算。

$$\sigma = \frac{40P}{\pi(2Kbh - a^2)} \tag{1}$$

式中,σ 为拉应力;a 为加载圆柱直径;b 为试样直径;h 为试样高度;K 为影响系数,取决于试样穿孔大小和土壤类型;P 为加载荷载。

对竖直向与水平向原状黄土在不同加载速率、不同加载圆柱直径和不同试验高度的加载柱下测定抗拉强度都必须遵从平行试验,以保证试验数据的可靠性。

2 试验结果与分析

2.1 加载速率对原状黄土的抗拉影响

为了保证不同加载速率适用于抗拉强度的试验,选用加载速率为0.6 mm/min、0.8 mm/min、1.0 mm/min、1.2 mm/min进行压裂试验,在相同间隔的贯入深度下记录对应的拉应力。从图1拉应力与不同加载速率的关系中看到,无论是竖直向还是水平向加载柱的贯入深度都是随着加载速率的增大而减小;当达到峰值强度时,加载柱的贯入深度与试样的抗拉强度呈现正线性相关。竖直向的原状土在0.6—1.0—1.2 mm/min的加载速率时可以得出随着加载速率的增大,试样的贯入深度减少,极限抗拉强度也减少,即加载速率与极限抗拉强度成反比;但原状土水平向试样却不符合这一规律,反而随着加载速率的增大,极限抗拉强度呈增大的正比关系。由此表明原状黄土竖直向与水平向因土质的固有结构不同,在抗拉强度方面呈现出相反的性质关系,通过研究不同方向试样在相同速率的极限抗拉强度也可以得出这一相反的性质关系(除0.6 mm/min外,其他3组速率都是竖直向的极限抗拉强度与加载速率呈反比,而水平向的极限抗拉强度与加载速率呈正比)。

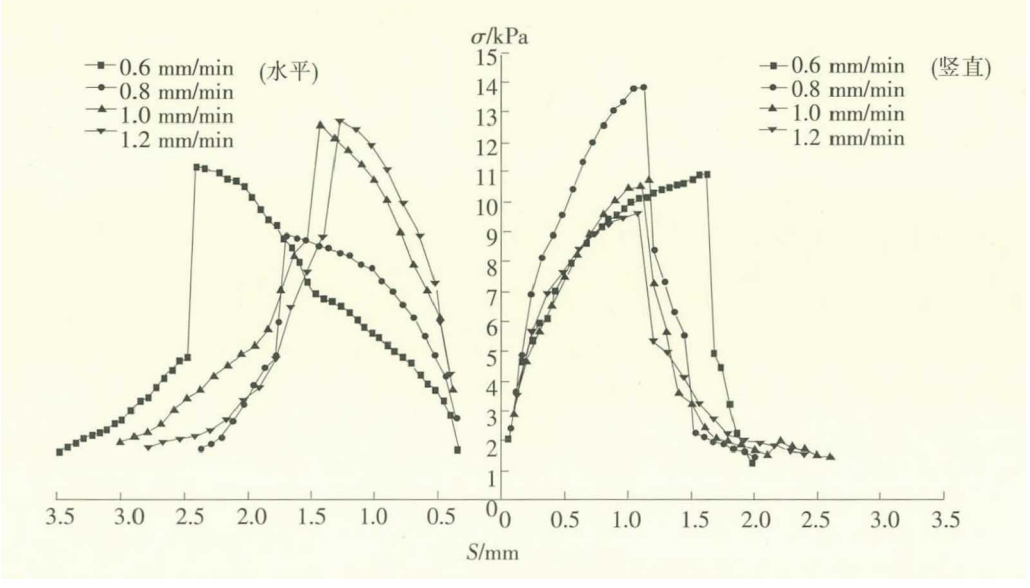

图1 拉应力与不同加载速率的关系

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

同时，无论竖直向还是水平向的原状黄土在加载速率都为 0.8 mm/min 时，抗拉强度数据在同向试样中呈现出差异化如图 2 不同速率下贯入深度与抗拉强度的线性拟合所示，针对此差异，分别对竖直向和水平向原状黄土从试验初始记录至极限抗拉强度之间的数据进行线性拟合。从判定系数 R^2 来看，竖直向在加载速率为 0.8 mm/min 时 $R^2 = 0.983\ 1$ 最大；水平向在加载速率为 0.8 mm/min 时 $R^2 = 0.877\ 8$ 最小。整体对比 0.8 mm/min 这一加载速率点的极限抗拉强度和线性拟合判定系数 R^2，可以得出：竖直向及水平向的原状黄土，在任意加载速率下进行压裂实验时，当贯入深度与抗拉强度接近线性关系时，试样的抗拉强度才会越大。同一速率制样方向不同的试样，贯入深度与抗拉强度的线性拟合判定系数却呈现两极化，这也对应前面提到的，土质固有结构的不同会导致性质上的差异。

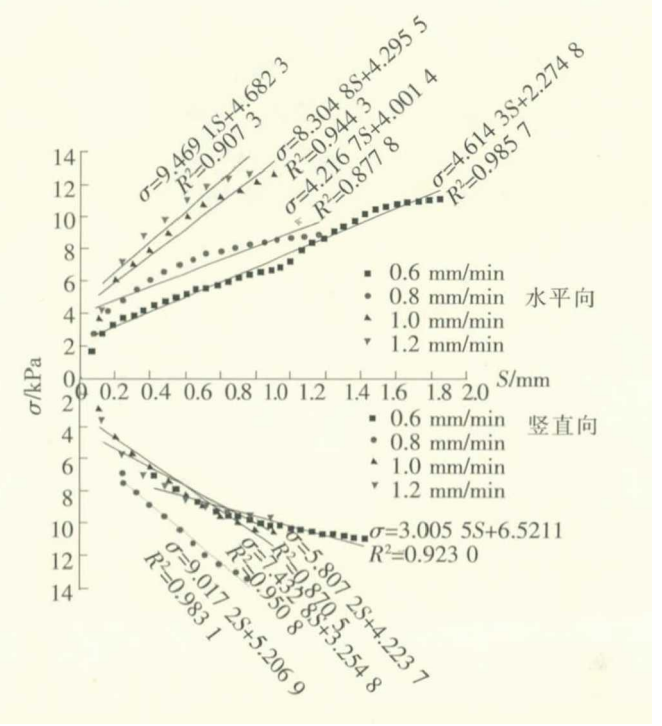

图 2　不同速率下贯入深度与抗拉强度的线性拟合

图 3 为竖直向与水平向的原状黄土在压裂试验时极限抗拉强度对应的贯入深度值比较，发现两者均随加载速率增大，贯入深度呈由大到小的递减趋势；竖直向与水平向原状黄土贯入深度的差值随加载速率的增大呈现上升趋势，得出竖直向贯入深度随加载速率增大而减小的幅度远小于水平向，且竖直向原状黄土在加载速率为 0.8～1.2 mm/min 时贯入深度变化值较为平稳，表明竖直向土质的固有结构比水平向的稳定；并且在加载速率为 1.0 mm/min 时，竖直向与水平向的贯入深度值相等，由此可得，竖直向原状黄土在加载速率为 1.0 mm/min 时测得的数据较优。

将不同速率下原状黄土 2 个制样方向的极限抗拉强度进行对比研究可绘制图 4。竖直向与水平向极限抗拉强度皆在 0.8 mm/min 时出现极值，从整体曲线的趋势上看具有高度的对称性；再结合差值的变化，可以得出：加载速率在 0.6～0.8 mm/min 时，竖直向原状黄土制样抗拉性质要优于水平向；加载速率在 0.8～1.2 mm/min 时，水平向原状黄土制样抗拉性质逐渐增强，在 0.95 mm/min 以后要优于竖直向。

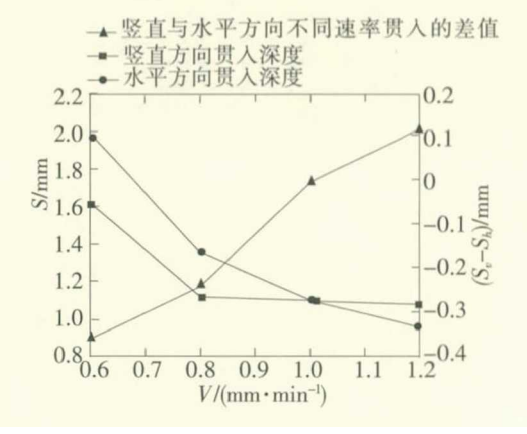

图 3　不同速率下竖直向与水平向极限抗拉强度贯入深度及差值曲线

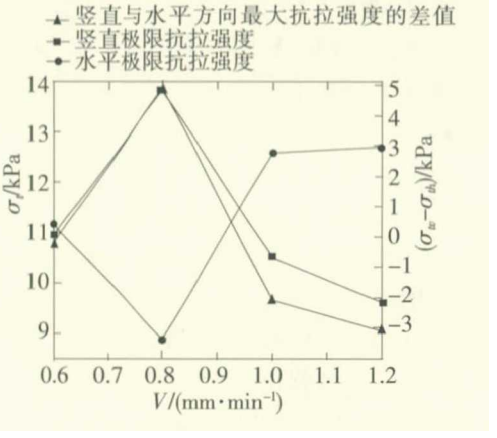

图 4　不同速率下竖直向与水平向极限抗拉强度及差值曲线

2.2　加载圆柱直径对原状黄土的抗拉影响

将加载圆柱直径控制为 0.20b、0.25b、0.30b，从而确保了试验数据的可靠性和准确性。从图 5 拉应

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

力与不同加载柱直径的关系可以明显看出,3 组原状黄土水平向在加载圆柱直径不同的条件下,极限抗拉强度与加载圆柱直径呈正比关系,同时 3 组极限抗拉强度对应的贯入深度皆为 1.5 mm。所以加载圆柱直径对水平向原状黄土的抗拉特性的影响得出:当加载圆柱直径增大时,试样的贯入深度不发生改变而极限抗拉强度会随之增加。竖直向试样的极限抗拉强度最大值出现在加载柱直径为 0.25b 时,极限抗拉强度对应的贯入深度最大值出现在加载柱为 0.20b 时。

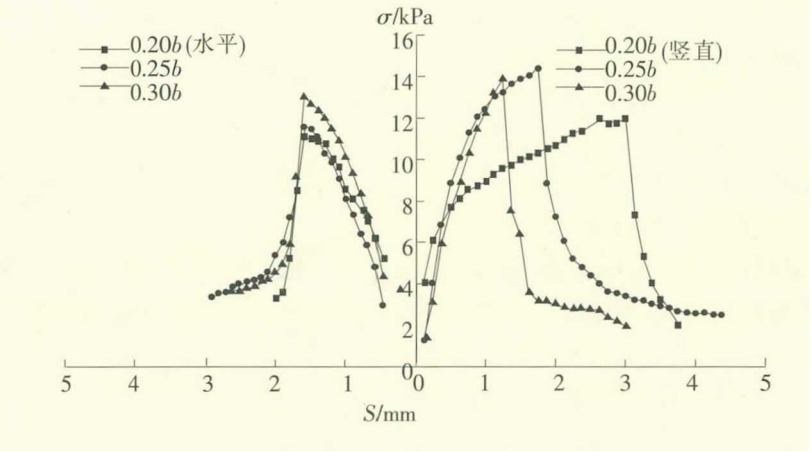

图 5 拉应力与不同加载柱直径的关系

对此差异,对竖直向试样的抗拉强度与贯入深度做了线性拟合以期在试样抗拉过程中找出结果差异的原因,其结果如图 6。从拟合结果来看,加载柱直径为 0.25b 的拟合判定系数 R^2 要比 0.20b 和 0.30b 的 R^2 要小,即表明试样在 0.25b 抗拉过程中的加载过程相较来说是缓一些的,从数据趋势上看 3 组试样在贯入深度为 0.125～0.875 mm 之间的抗拉强度都在快速增大,其中 0.25b 试样的抗拉强度在此阶段要比 0.20b 和 0.30b 增长的幅度都要大,从而得到加载过程相较缓一些的情况。3 份土质一样的试样出现这一差异表明,在 0.25b 直径的加载柱加压时,试样能够有效地抵抗受到的拉力,使抗拉强度得到明显提升。

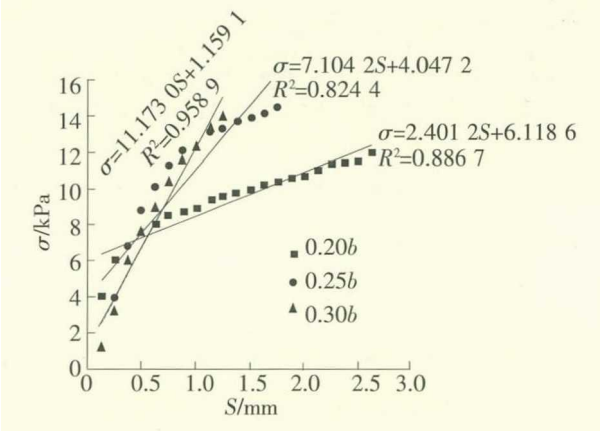

图 6 不同加载柱直径下竖直向原状黄土抗拉强度—贯入深度的线性拟合

在不同直径的加载圆柱条件下,将原状黄土竖直向的最大抗拉强度与水平向的最大抗拉强度进行对比,绘制图 7。竖直向试样的抗拉强度在 0.20b～0.25b 呈增长趋势即表示竖直向试样的土质结构在此阶段抗拉特性得到了提高,0.25b～0.30b 呈下降趋势表明试样的抗拉特性已经达到极限,导致表现出来的抗拉强度不增反降;而水平向试样的抗拉强度在 0.20b～0.30b 都是增长趋势,说明水平向试样的土质结构的抗拉特性在不断提高且未达到极限。虽然水平向试样的抗拉强度在整个试验阶段都是增长趋势,但从数值上看,在同一加载柱直径下,水平向试样抗拉强度均小于竖直向,这也从加载柱直径这个角度验证了:原状黄土竖直向取样的土质结构要比水平向取样更稳定。

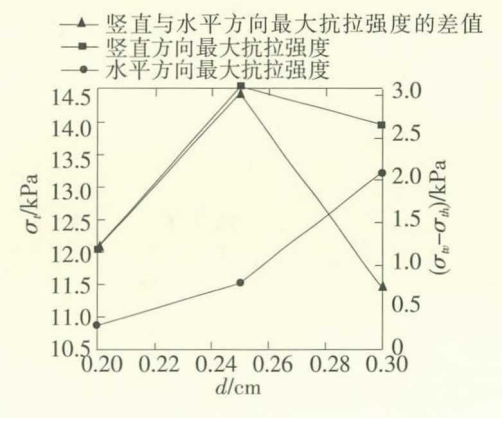

图 7 不同加载柱直径下竖直向与水平向极限抗拉强度及差值曲线

如图 8 所示,对竖直向与水平向原状黄土在直径不同的加载柱条件下的极限抗拉强度对应的贯入深度进行比较,可看出水平向试样在整个试验过程中,极限抗拉强度对应的贯入深度均为 1.5 mm,所以加

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

载柱的直径变化对水平向试样极限抗拉强度对应的贯入深度并无影响，竖直向试样极限抗拉强度对应的贯入深度却呈现明显的下降趋势，表明加载圆柱直径的变化对竖直向试样极限抗拉强度对应的贯入深度影响很大。

2.3　试样高度对原状黄土的抗拉影响

王惠敏[15]、李春清等[4]证明试样高度控制在 5.18～8.18 cm 内对轴向压裂试验测试结果的影响最为显著。通过对 5 cm、6 cm、7 cm、8 cm 的试样高度进行试验得出，原状黄土达到极限应力时，高度为 6 cm 的试样贯入深度值最小，竖直方向高度为 5 cm 的试样抗拉强度最强；对此数据进行线性拟合得出：竖直向原状黄土存在高度线性相关，其高度为 7 cm 试样的抗拉强度与贯入深度之间关系式为 $\sigma = 6.575\,5S + 2.218\,5$，其相关系数为 0.993 5，如图 9 所示。

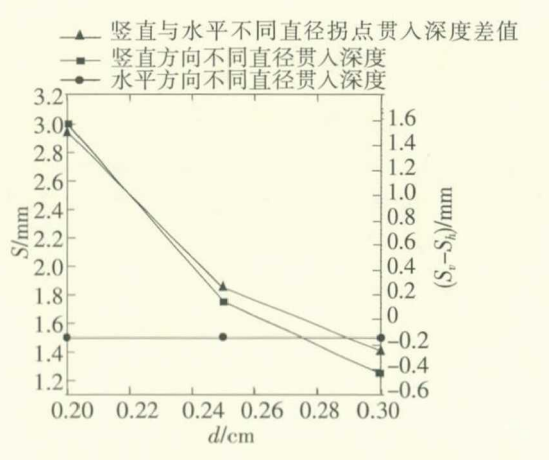

图 8　不同加载柱直径下竖直向与水平向极限抗拉强度贯入深度及差值曲线

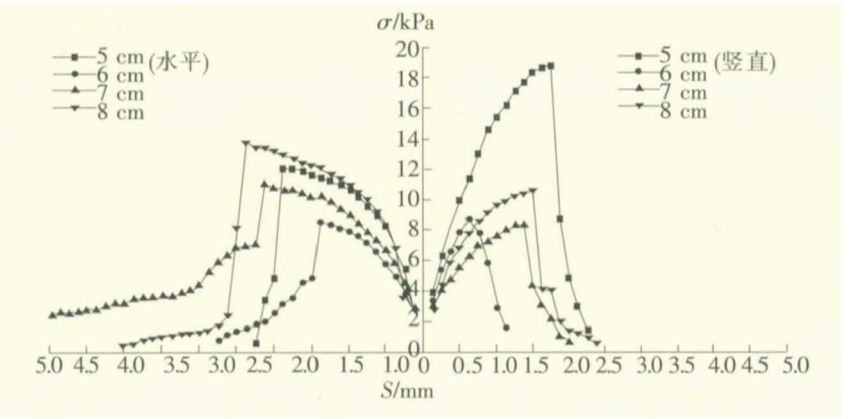

图 9　拉应力与不同试样高度的关系

图 10 表明试样的抗拉强度随试样高度的增大而逐渐减小再增大的过程；当试样高度为 6 cm 时，竖直向与水平向极限应力的差值趋向于 0，则竖直向与水平向抗拉强度接近，且竖直向的试样随试样高度的增大而抗拉强度变化缓慢。

图 11 中试样高度从 6 cm 到 7 cm 竖直向与水平向极限抗拉强度贯入深度的差值平稳且位于变化过程的中间位置，由此可以得出：选试样高度为 6 cm 到 7 cm 竖直向原状黄土作为研究抗拉特性的因素之一较优。

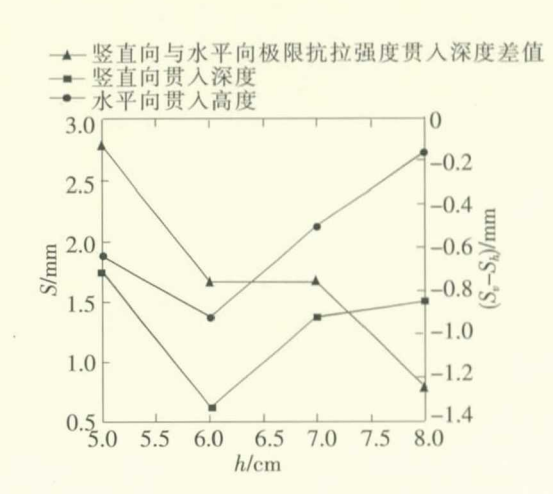

图 10　不同高度下竖直向与水平向极限抗拉强度及差值曲线

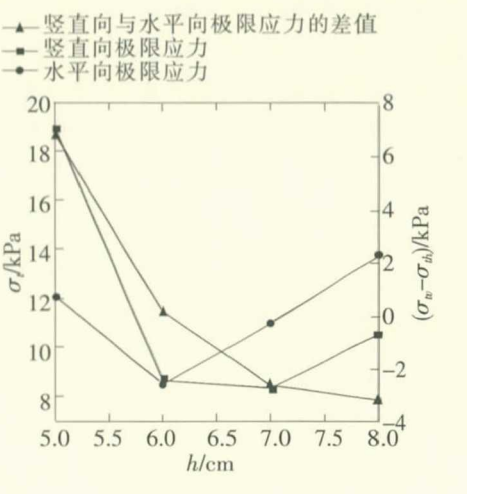

图 11　不同高度下竖直向与水平向极限抗拉强度贯入深度及差值曲线

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

3 结论与讨论

本文主要讨论了原状黄土竖直向与水平向试样在压裂试验中不同加载速率、不同加载柱直径、不同试样高度条件下的抗拉特性,得出以下结论:

(1)原状黄土竖直向取样与水平向取样的压裂试验在不同加载速率条件下,抗拉强度特性呈现相反的性质关系,这说明竖直向与水平向因土质结构不同,在抗拉强度方面也呈现不同性质。在随后的竖直向与水平向不同加载速率,极限抗拉强度以及对应的贯入深度和加载圆柱直径不同条件下的对比,把不同的性质总结为竖直向土质结构在抗拉强度方面要优于水平向。

(2)对于加载速率为0.8 mm/min时竖直向与水平向抗拉强度数值异常的探究,得出无论竖直向还是水平向的原状黄土,在任意加载速率下进行压裂试验时,当贯入深度与抗拉强度接近线性关系时,试样的抗拉强度才会增大。

(3)在加载柱直径变化的试验中,发现当加载圆柱直径增大时,水平向试样的贯入深度不变,而极限抗拉强度会随之增加,这也就说明水平向试样的加载柱直径与抗拉强度为正相关。

(4)高度为6 cm和7 cm的竖直向原状试样,在抗拉强度与贯入深度之间存在高度线性相关,则选此作为研究抗拉强度特性较优。

但无论是对原状黄土各向异性的研究,还是抗拉特性相关的研究,论述的还不够全面,尚有不足之处:①除水平与竖直向外应对原状黄土进行30°、45°等的多方向、多角度取样;②应对原状黄土抗拉特性的制样方法等多种影响因素进行充分探讨。故今后希望对此方面进行试验。

参 考 文 献

[1]任宇涛. 2∶8灰土无侧限抗压强度、抗折与劈裂抗拉强度研究及灰土垫层质量评价方法探析[D]. 西安:西安建筑科技大学,2010.

[2]骆亚生,邢义川. 黄土的抗拉强度[J]. 陕西水力发电,1998(4):7-11.

[3]孙超. 泾河南岸黄土抗拉强度试验研究[C]//2016年全国工程地质学术年会论文集. 北京:工程地质学报编辑部,2016.

[4]李春清,吴旭阳,梁庆国,等. 轴向劈裂试验参数对原状黄土抗拉强度的影响分析[J]. 兰州工业学院学报,2017,24(6):10-13.

[5]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):233-238,248.

[6]孙纬宇. 陕西延安Q_2原状与重塑黄土抗拉强度对比试验研究[C]//中国土木工程学会第十二届全国土力学及岩土工程学术大会论文摘要集. 北京:中国土木工程学会土力学及岩土工程分会,2015.

[7]胡志平,王强,张雨禾,等. 应力、应变控制下压实黄土动力特性研究[J]. 地震工程学报,2018,40(6):1161-1167.

[8]张吾渝,陈伟,常立君,等. 中主应力对击实黄土强度和变形特性的影响[J]. 地震工程学报,2016,38(4):554-557,587.

[9]王军海,刘亚明. 基于动三轴试验的压实黄土动强度特性研究[J]. 地震工程学报,2016,38(3):439-444.

[10]王文胜. 浅埋大跨黄土隧道下穿公路方案比选[J]. 石家庄铁道大学学报:自然科学版,2016,29(2):45-49,55.

[11]常立峰,孙志杰. 大断面黄土隧道洞口段施工数值模拟分析[J]. 石家庄铁道大学学报:自然科学版,2015,28(2):32-37.

[12]员康锋,赵建斌,李宏儒,等. 晋南黄土结构性与湿陷性的相关性研究[J]. 石家庄铁道大学学报:自然科学版,2014,27(4):37-40.

[13]王辉,岳祖润,叶朝良. 原状黄土及重塑黄土渗透特性的试验研究[J]. 石家庄铁道学院学报:自然科学版,2009,22(2):20-22,31.

[14]马林,方娟,申俊敏. 平面应变与常规三轴实验下黄土的力学特性分析[J]. 石家庄铁道大学学报:自然科学版,2013,26(3):94-98.

[15]王惠敏,张云,鄢丽芬. 黏性土试样高度对抗拉强度的影响[J]. 水文地质工程地质,2012,39(1):68-71.

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

Study on Tensile Strength of Original Loess in Lanzhou, Gansu

Xu Shanchang, Yu Pengtao, Zhao Xiaofang, Zhang Yuanyuan, Diao Lu

(Tianjin University Renai College, Tianjin 301636, China)

Abstract: Using the vertical and horizontal sampling of the original loess of Wangjiagou Tunnel in Lanzhou, Gansu Province, the paper analyzed tensile properties of undisturbed loess under anisotropic conditions with different loading rate, different loading diameter and different specimen height by fracturing test. The study shows that the tensile strength of the vertical sampling of undisturbed loess is better than that of horizontal sampling; under the condition of arbitrary loading rate, the tension of the specimen penetration depth and tensile strength is closer to the linear relationship. The tensile strength of the horizontal specimen has a strong linear relationship with the diameter of the loaded cylinder. The selected specimen height of 6 cm to 7 cm vertical to undisturbed loess as one of the factors to study the tensile properties of the better.

Key words: undisturbed loess; tensile strength; the anisotropic loading rate; loaded cylinder diameter

(上接第 38 页)

Analysis of Force Evolution of Pile Anchor Mixed Enclosure Structure System in Deep Foundation Pit Application

Zhang Zhi[1], Zhu Zhengguo[1,2], Li Zhenyuan[1], An Haitao[1]

(1. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;
2. Hebei Technology and Innovation Center on Safe and Efficient Mining of Metal Mines, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: Taking the construction of deep foundation pit of the mine drainage section of Dongli Station of Shijiazhuang Metro Line 3 as the research background, the simulation study on the force evolution law of pile-anchor mixed retaining structure system in deep foundation pit using FLAC3D software was conducted. The evolutionary law of pile-anchor mixed enclosure structure in deep foundation pit was quantitatively analyzed from the aspect of stress. It was found that the force of supporting system increased with the increase of excavation depth of foundation pit. Then the mechanism of axial force loss of anchor cable in pile-anchor enclosure structure was further studied, it was found that the axial force loss was less in the range of 5°～30° and the axial force of the free section of the anchor cable could be increased appropriately by increasing the axial force and the length of the free section. Besides, compensation measures of compensate tension and super tension were analyzed to determine the best anchor stress compensation measures.

Key words: deep foundation pit; pile-anchor structure; prestress loss; compensation measures

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net