

高应力下砂土与钢材界面单剪试验研究

郭佳奇¹ 刘希亮²

(1. 北京交通大学土建学院, 北京 100044; 2. 河南理工大学土木学院, 河南焦作 454000)

【摘要】 疏排水沉降引起的竖直附加力导致了华东地区多个立井井筒破裂, 高应力下土与结构界面剪切特性研究是解决这一工程问题的关键。在自行加工、改造的高应力单剪仪试验系统上进行了一系列单剪试验。试验数据分析表明高应力下砂土同钢材界面剪应力-剪切位移关系可用非线性弹性-理想、塑性本构关系描述; 高应力下界面的强度准则符合无粘聚力的莫尔-库仑公式表示。

【关键词】 高应力; 单剪试验; 界面模型; 界面强度准则

【中图分类号】 TU 411.7

【文献标识码】 A

doi:10.3969/j.issn.1007-2993.2009.03.008

Mechanical Behavior of Interface Between Sand and Steel in Simple

Shear Tests Under High Normal Stress

Guo Jiaqi¹ Liu Xiliang²

(1. School of Civil Engineering & Architecture, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044;

2. School of Civil Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, Henan, China)

【Abstract】 Vertical additional force outside surface of the shaft lining caused by dewatering settlement of bottom aquifer in the thick alluvium induced shaft fracture in east china. The study on shearing property of interface between soil and structure under high stress is key to solve this engineering problem. A series simple shear tests about interface were carried out on the manufactured, modified simple shear system under high stress. The analysis of testing data demonstrates that the relationship of stress and shearing displacement can be described as nonlinear elastic-ideal plastic model, and that the strength criterion of interface accords with Mohr-Coulomb through origin.

【Key words】 high stress; simple shear test; interface model; strength criterion of interface

0 引言

从 1987 年以来, 华东地区的淮北、大屯、徐州、淮南以及兖州等矿区在深厚表土内用特殊施工方法(冻结法和钻井法)施工的立井井筒先后有 70 多个发生了井壁压裂事故^[1], 造成十几亿元的直接经济损失, 而且这一事故还在发生。井壁的破裂严重影响了煤矿的安全生产, 破裂的机理成为岩土工程界、采矿界以及相关领域专家学者争论的焦点, 先后提出了竖直附加应力说、施工质量说、构造运动说、地震说、渗流变形说以及“竖井三因素综合破坏机理说”等^[2-9]。通过大量的室内模拟试验及井壁结构在不同荷载作用下的破坏形态与现场破坏形态的对比分析^[10-12], 找到了与井壁破坏模式相匹配的荷载形式。

后来专家、学者接受了由中国矿业大学岩土工程研究所崔广心教授等人所提出的竖直附加应力说, 这一学说现已成为进一步研究和治理井壁破裂的指导性理论。该理论认为: 由于井筒周围地层位移与井壁位移的不完全同步的原因, 导致井壁外表面产生了向上或向下的竖直附加力。由底部含水层疏排水沉降引起的井壁破裂受井壁与周围土体相互作用的控制, 界面模型的确定是解决井壁破裂的重大技术关键, 而目前界面问题的研究成果大多是低应力下通过直接剪切试验获得的。直接剪切试验存在着剪切破坏面人为设定、法向应力在剪切过程中逐渐增大的特点, 与深厚表土内井壁与围土的剪切特性的实际情况(剪切破坏面事先未知、法向应力恒定不变)有出入, 直剪试验难以充

基金项目: 河南省杰出青年计划基金(084100510004); 河南省自然科学基金(0611010600)

作者简介: 郭佳奇, 1981 年生, 男, 汉族, 河南周口人, 博士研究生, 主要从事隧道及地下工程方面的研究工作。E-mail: gjq519@163.com

分反映这一特征。在河南省相关基金的资助下,自行改装、加工了高应力单剪仪试验系统,利用此系统开展高应力作用界面单剪特性的试验研究。本试验对饱和砾砂、粗砂、中砂、细砂与钢材界面的单剪特性进行了初步研究。

1 试验方法

1.1 试验仪器

至今国内外生产的直剪仪或单剪仪,其垂直载荷均为 5 kN 或 10 kN,最大垂直应力为 1.6 MPa 或 3.2 MPa,不能满足本课题研究的需要。我们在河南理工大学现有的岩石力学试验系统的基础上进行了改装,重点对单剪盒以及其配套装置进行了专门的设计加工,以满足试验要求。该系统由主机、测量系统、控制系统及数据处理系统四部分组成。垂直荷载能达到 1000 kN,剪切荷载达到 500 kN,剪切行程可达 20 mm,可实现自动加载、自动控制,具有数据实时采集、动态显示、绘制图表等功能。试验设备详细情况见文献[13]。

1.2 土样配制及试验过程

取适量建筑砂(初步筛除较大的碎石)在室外自然风干,然后在室内烘箱内 106 °C 下,烘 1 h,取出、放置一段时间,然后进行筛分,筛分出 0.075~0.25 mm、0.25~0.5 mm、0.5~2 mm、2 mm 以上四个粒径组。按文献[14]的要求配制出砾砂、粗砂、中砂、细砂,在试样中掺入稍许粘粒,进行饱和。先测定出各种饱和砂土的密度,然后按土样面积 176.6 cm²、高 10 cm 的要求,计算出 1766 cm³ 的土样质量,按所需质量称取土样并放置于剪切装置中进行试验。各砂土特征粒径和特性参数见表 1。

表 1 砂特征粒径及特性参数

土类	d_{60}	d_{50}	d_{30}	d_{10}	C_u	C_c
砾砂	3.000	1.538	0.620	0.301	9.97	0.460
粗砂	1.264	1.065	0.701	0.250	5.506	1.555
中砂	0.360	0.334	0.282	0.207	1.739	1.067
细砂	0.143	0.126	0.101	0.083	1.723	0.859

首先,对土样进行饱和、固结,固结稳定标准基本上控制在 0.0025 mm/min;然后,在法向荷载不变的条件下,进行界面剪切试验,当剪应力-剪切位移关系曲线出现平台或者剪切位移大于 20 mm 时(不出现平台的情况下)停止剪切,具体操作过程,按照《土工试验规程》(GB/T 50123—1999)的要求进行^[14]。

2 试验结果

2.1 试验结果分析

根据试验数据,绘制界面剪应力-剪切位移曲

线,见图 1、图 2、图 3、图 4、图 5。

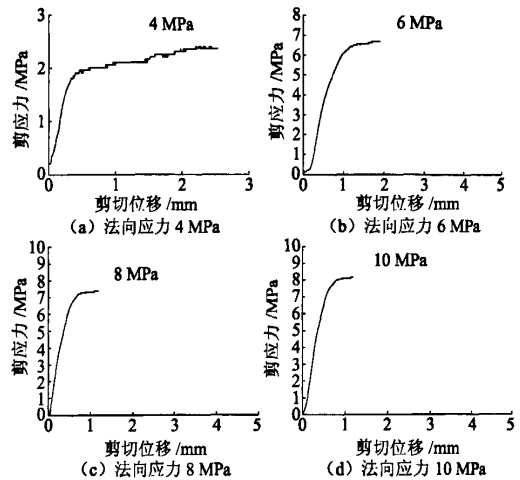


图 1 钢材与钢材界面的剪应力-剪切位移关系曲线

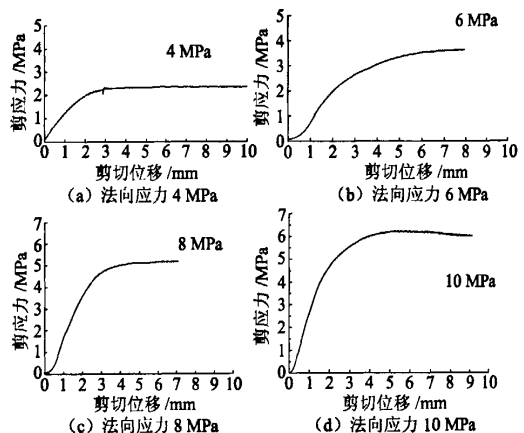


图 2 砾砂与钢材界面的剪应力-剪切位移关系曲线

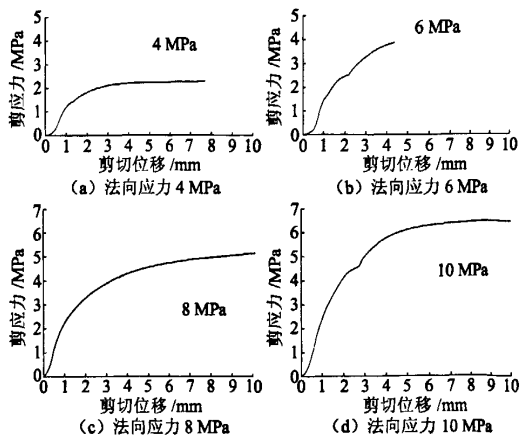


图 3 粗砂与钢材界面的剪应力-剪切位移关系曲线

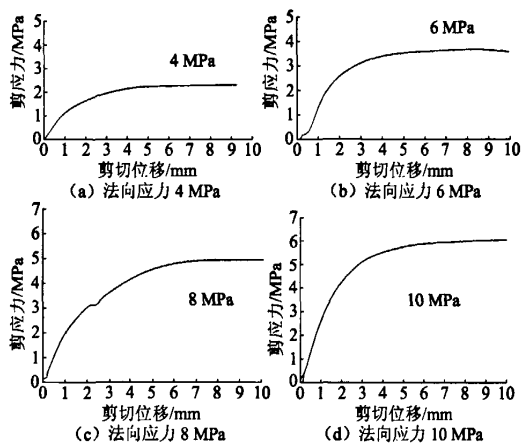


图4 中砂与钢材界面的剪应力-剪切位移关系曲线

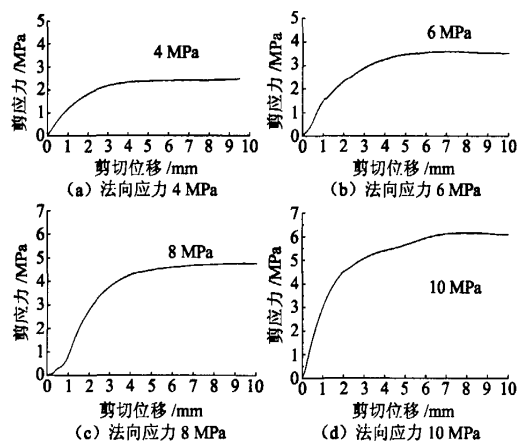


图5 细砂与钢材界面的剪应力-剪切位移关系曲线

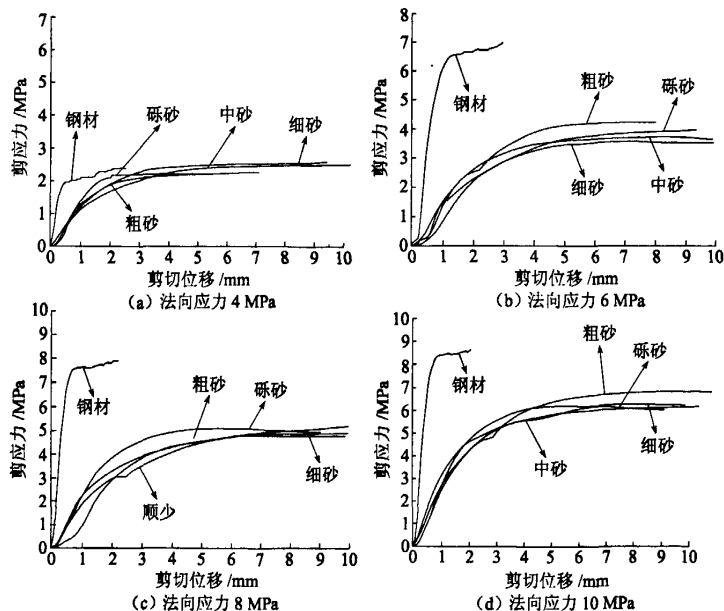


图6 相同法向应力下界面抗剪特性比较(钢材基底)

由上述各图分析得到下面的一些结论:

1) 砂土与钢材界面的平均剪应力随剪切位移的增大而增大,二者呈明显的非线性关系。界面剪应力-剪切位移关系曲线未出现应变软化现象,除个别试验出现应变硬化现象外,大部分曲线在达到最大剪应力后,发生塑性流动;达到最大剪应力所需剪切位移大致为3~6 mm。

2) 钢材与钢材界面的剪应力-剪切位移在法向应力4 MPa和6 MPa时出现了轻微应变硬化现象,剪应力-剪切位移呈弹塑性关系,在较高的应力水平时发生了塑性流动,表现出理想塑性的特点,二者呈线弹性-理想塑性关系;无论是较高应力时或相对较低应力时,界面的剪应力-剪切位移曲线前段更接近于直线,呈线弹性关系,达到最大剪应力所需要的剪切位移在1 mm左右。从法向应力4 MPa到6 MPa界面抗剪强度增加非常明显,从6 MPa到8 MPa、8 MPa到10 MPa界面抗剪强度增加相对缓慢。

3) 砂土与钢材界面剪应力-剪切位移曲线与直剪试验结果明显不同。在直剪条件下二者呈非线性弹性关系,在高应力单剪条件下二者呈非线性弹性-理想塑性关系。

4) 法向应力越高,达到最大剪应力所需的剪切位移也越大,同一组试验法向应力越高,界面初始剪切刚度也越大。

5) 界面剪切刚度随剪切位移的增大而减小。

2.2 试验结果比较

为了比较相同法向应力水平下不同材料同钢材基底界面的剪应力-剪切位移关系曲线见图6。

对相同法向应力水平下砂土与钢材界面的剪应力-剪切位移关系曲线同钢材与钢材界面关系曲线的对比分析知:钢材与钢材界面的抗剪强度大于砂土与钢材界面的抗剪强度;钢材与钢材界面的剪切刚度大于砂土与钢材界面的剪切刚度,且这种差别在较高的法向应力水平下更加显著。

相同法向应力水平下,几种砂土同钢材基底的界

面剪切特性虽略有差别,但基本变化趋势大致相同。

3 界面抗剪强度准则

根据在试验设备上对饱和砾砂、粗砂、中砂、细砂在不同应力水平下同钢材界面剪切特性的试验中采集的试验数据,确定不同砂土在不同法向应力下的最大剪应力,见表2,对法向应力及其对应的最大剪应力进行回归分析,见表3、图7。

表2 界面抗剪强度(最大剪应力)

钢材	应力水平/MPa	抗剪强度/MPa	钢材	应力水平/MPa	抗剪强度/MPa
砾砂	4	2.300396	中砂	4	2.321631
砾砂	6	3.718130	中砂	6	3.687712
砾砂	8	5.213000	中砂	8	5.103341
砾砂	10	6.214609	中砂	10	6.228766
粗砂	4	2.300396	细砂	4	2.477350
粗砂	6	4.104328	细砂	6	3.609853
粗砂	8	5.358154	细砂	8	4.813137
粗砂	10	6.462344	细砂	10	6.242922

表3 试验数据过原点的线性回归结果

界面特性	tan δ		相关系数
	数值	误差	
砾砂—钢材	0.627	0.012	0.99662
粗砂—钢材	0.654	0.015	0.99316
中砂—钢材	0.623	0.008	0.99883
细砂—钢材	0.613	0.006	0.99851

如下结论:

1) 界面平均剪应力同剪切位移呈明显的非线性关系;剪应力-剪切位移关系曲线没有出现应变软化现象,大部分曲线在达到最大剪应力后,发生了塑性流动;剪应力-剪切位移非线性弹性-理想塑性关系;钢材与钢材界面的剪应力-剪切位移关系曲线在较低的法向应力水平下表现出应变硬化现象,呈弹塑性关系,较高的应力水平下表现出理想塑性的特点,呈线弹性-理想塑性关系。其界面抗剪强度及初始剪切刚度都较同应力水平下砂土钢材界面的大。

2) 法向应力越高,达到最大剪应力所需的剪切位移也越大;同一组试验法向应力越高,初始剪切刚度也越大;界面剪切刚度随剪切位移的增大而逐渐减小。

3) 砂与钢材界面的最大剪应力同法向应力具有较好的线性关系,可采用无粘聚力的库仑公式表示二者的关系。

参考文献

[1] 崔广心,杨维好,吕横林.深厚表土层中的冻结壁和井壁[M].徐州:中国矿业大学出版社,1998.
 [2] 楼根达,陈湘生.关于疏排水沉降地层中井壁破坏问题的认识与建议[J].建井技术,1998,19(1):1-4.
 [3] 杨维好,崔广心,周国庆,等.特殊地层条件下井壁破裂机理与防治技术的研究(之一)[J].中国矿业大学学报,1996,25(4):1-5.
 [4] 周国庆.特殊地层含水层注浆加固参数与井壁附加力关系的研究[D].徐州:中国矿业大学,1996.

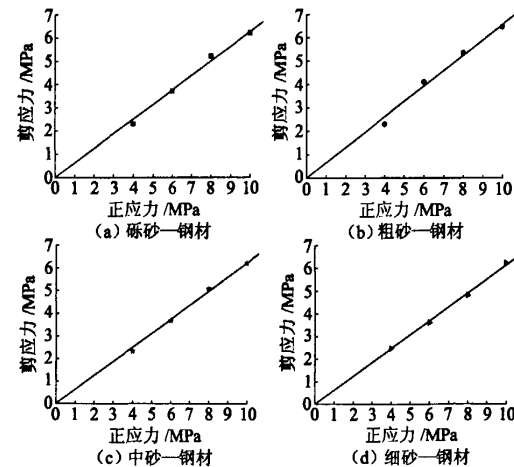


图7 不同界面的剪应力正应力过原点的线性回归结果

根据上述分析知,砂与钢材界面的最大剪应力同法向应力具有较好的线性关系,从表3的回归结果看,采用无粘聚力的库仑公式回归相关系数均在0.98以上,界面摩擦角的误差在0.018以下,具有较高的可信度。

4 结论

通过对不同应力水平下对饱和砾砂、粗砂、中砂以及细砂同钢材界面单剪试验数据的数据处理得到

- 4358-4367.
- [3] 郑俊杰,陈保国,Abusharar S W,等.双向增强体复合地基桩土应力比分析[J].华中科技大学学报(自然科学版),2007,35(7):110-113.
- [4] Terzaghi K. Stress distribution in dry and in saturated sand above a yielding trap-door [C]. Proc. 1st Int. Conf. Soil Mechanics. Harvard University, Cambridge, 1936:307-311.
- [5] Hewlett W J, Randolph M F. Analysis of piled embankment[J]. Ground Engineering, 1988, 21(3):12-18.
- [6] 陈云敏,贾宁,陈仁朋.桩承式路堤土拱效应分析[J].中国公路学报,2004,17(4):1-6.
- [7] Low B K, Tang S K, Choa V. Arching in piled embankments[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1994, 120(11):1917-1938.
- [8] Han J, Gabr M A. Numerical analysis of geosynthetic-reinforced and pile-supported earth platforms over soft soil[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2002, 128(1):44-53.
- [9] 饶为国,赵成刚.桩-网复合地基应力比分析与计算[J].土木工程学报,2002,35(2):74-80.
- [10] Chen Y M, Cao W P, Chen R P. An experimental investigation of soil arching within basal reinforced and unreinforced piled embankments[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2008, 26(2):164-174.

收稿日期:2008-12-08

(上接第142页)

- [5] 崔广心.特殊地层条件竖井破坏及防治技术[J].建井技术,1998,19(1):28-32.
- [6] 陈湘生.华东地区立井井壁破坏原因浅析[J].建井技术,1997,18(6):1-3.
- [7] 毕思文.徐淮地区煤矿竖井变形破坏特征与机理探讨[J].建井技术,1997,18(3):37-39.
- [8] 周治安.厚松散覆盖层底部机械潜蚀与黄淮地区井筒破裂[J].煤炭科学技术,1993(9):45-50.
- [9] 张建怡,卞政修.黄淮地区新构造活动与井壁损坏[J].煤炭科学技术,1992(3):31-34.
- [10] 崔广心,程锡禄.徐淮地区井壁原因的初步研究[J].煤炭科学技术,1991(8):46-50.
- [11] 杨维好.深厚表土层中井壁垂直附加力变化规律的研究[D].徐州:中国矿业大学,1993.
- [12] 杨俊杰,刘全林.由混凝土强度理论分析井壁的破坏特征和机理[J].淮南矿业学院学报,1995,15(4):18-23.
- [13] 郭佳奇.高应力下土与结构界面单剪试验及本构关系研究[D].焦作:河南理工大学,2007.
- [14] 中华人民共和国水利部. GB/T 50123—1999 土工试验方法标准[S].北京:中国计划出版社,1999.

收稿日期:2009-03-23