

DOI: 10.16285/j.rsm.2019.1500

滑动测微管抗渗能力的测试装置及试验研究

刘争宏^{1,2,3}, 张 龙^{2,3}, 郑建国^{2,3}, 张 炜^{2,3}, 于永堂^{2,3}

(1. 长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054; 2. 机械工业勘察设计研究院有限公司, 陕西 西安 710043;
3. 陕西省特殊岩土与处理重点实验室, 陕西 西安 710043)

摘 要: 使用滑动测微技术进行桩身内力测试, 测管安装时的防渗处理是该技术实现高质量测试的关键, 已有处理措施鲜有其防渗效果的定量研究。研发了一套滑动测微管抗渗能力测试装置, 对 3 种常用防渗处理措施不同压差下的渗流量进行了测定, 得到计算渗流量的公式, 结合现场条件分析了测管安装的注意事项。结果表明, 测管内压力大时的渗流量要远大于测管外压力大时的渗流量; 涂胶是一种效果非常好的防渗措施, 采用该措施后一般不会有超过 0.005 mm 粒径的颗粒进入测管; 增加测管内水头有利于减少杂质进入测管, 但测管内水头不能高出桩孔内液面太多; 灌注混凝土后, 若测管内有水溢出应封闭测管限制水的溢出, 若测管内水位下降, 则应开放测管允许气体进入测管。

关 键 词: 滑动测微计; 桩基础; 内力测试; 防渗措施

中图分类号: TU 473.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2020) 07-2504-10

Testing device and experimental study on anti-seepage ability of sliding micrometer tube

LIU Zheng-hong^{1,2,3}, ZHANG Long^{2,3}, ZHENG Jian-guo^{2,3}, ZHANG Wei^{2,3}, YU Yong-tang^{2,3}

(1. College of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China;
2. China JK Institute of Engineering Investigation and Design Co. Ltd., Xi'an, Shaanxi 710043, China; 3. Shaanxi Key Laboratory for the Property and Treatment of Special Soil and Rock, Xi'an, Shaanxi 710043, China)

Abstract: It is a way to measure the internal force of pile foundation by sliding micrometer, and the anti-seepage measures during the installation of sliding micrometer tube are the key to achieve high quality test, while quantitative research on anti-seepage effect of measures is rare. A set of device for testing the anti-seepage ability of sliding micrometer tube was developed. The seepage flow of three common anti-seepage measures under different pressure differences was tested, and a formula for calculating the seepage flow was developed. The matters needing attention in the installation of the sliding micrometer tube were analyzed according to the site conditions. Test results show that when the internal pressure is higher than the external pressure, the seepage flow rate is much larger than that when the external pressure is larger than the internal pressure. Glue coating is a very effective anti-seepage measure, and generally no particles with a diameter over 0.005 mm will enter the sliding micrometer tube after adopting this measure. Increasing the water head in the sliding micrometer tube is beneficial to reduce impurities entering it, but the water head in the sliding micrometer tube can not be too much higher than the liquid levels in the borehole of the pile. After pouring concrete, if water overflow in the sliding micrometer tube happens, the orifice of the sliding micrometer tube should be closed to limit water overflow, and if the water level in the sliding micrometer tube falls, the orifice of the sliding micrometer tube should be opened to allow gas to enter it.

Keywords: sliding micrometer; pile; stress test; anti-seepage measure

1 引 言

桩基础内力测试对桩基设计和桩基承载性状的

研究具有重要意义。目前, 桩基内力测试的方法可分为点测法和线测法两类。点测法在桩身内间隔一定深度埋设传感器获得桩身内力, 其特点在于测得

收稿日期: 2019-09-02

修回日期: 2019-12-16

基金项目: 陕西省科技统筹创新工程计划项目 (No. 2016KTZDSF04-05-01); 陕西省重大科技成果转化引导专项项目 (No. 2015KTG01-08); 中国机械设备工程股份有限公司科技研发基金支持项目 (No. CMEC-KJYF-2016-06)。

This work was supported by the Science and Technology Overall Innovation Project of Shaanxi Province (2016KTZDSF04-05-01), the Transformation and Guidance of Major Scientific and Technological Achievements Project of Shaanxi Province (2015KTG01-08) and the Science and Technology R & D Fund Project of China Mechanical Engineering Corporation (CMEC-KJYF-2016-06).

第一作者简介: 刘争宏, 男, 1980 年生, 博士研究生, 教授级高级工程师, 主要从事特殊土相关的工程实践与研究。E-mail: liu_zh2004@163.com

的应变是间断、非连续的。线测法在桩身内连续埋设用于测试应变的介质,其特点在于测得的应变是连续、不间断的。点测法测点少,局部传感器出现问题影响大,数据分析时也常常受到混凝土不均质所带来的问题的困扰。而线测法内力测试得到连续变化的应变,测点多,局部问题不足以影响整体,数据处理过程中的应变拟合^[1]环节可部分消除混凝土不均质带来的测试误差,提高测试结果的总体精度;此外,线测法对于测试承受负摩阻力桩的中性点深度,以及测试不同深度处的桩身变形具有点测法不能企及的优势。

滑动测微计属于线测法测试技术,测试精度高,是规范^[2]推荐的一种桩基内力测试技术;但该技术对测管(滑动测微管)的埋设(安装)要求非常高,要求测管内的测标表面始终是清洁的。因此,现场埋设时测管的防渗措施非常关键,防渗措施不好可能使得桩孔中的泥土和水泥颗粒通过渗流大量进入测管污染测标,影响测试的精度和效果,反之防渗措施好则可为测标的清洁提供重要保障,保证测试的良好精度和效果。《滑动测微测试规程》^[3]基于工程经验,提出了涂胶、防水胶带加强、设置水头差等测管防渗措施,但其效果如何,工程现场测管安装还需要注意些什么问题,却缺乏定量化的科学研究。本文为此专门设计和制作了一套装置,定量测试了不同防渗措施的防水性能和渗透特征,基于测试数据和理论分析提出了测管安装过程中应注意的事项,可以直接指导滑动测微计桩身内力测试的测管安装工程实践,同时也可类似试验装置设计以及滑动测微计用于岩体、大坝变形监测等其他用途的测管安装提供参考。

2 滑动测微计测试原理

2.1 测试原理

滑动测微计是20世纪80年代初瑞士联邦苏黎世科技大学 Kovari 教授等^[4-6]基于线测法监测原理研制出的一种高精度变形测试仪器,测试精度可达 $\pm 0.003 \text{ mm}$ 。国内最早由中国科学院武汉岩土力学研究所李光煜教授^[7]引进该仪器和技术,现已成功应用于桩基、隧道、大坝等^[8-17]工程的检测与监测中。图1为滑动测微计的测试原理图,测标与探头是核心,为了实现变形测试的高精度,滑动测微计使用了球-锥定位原理,该原理是指当锥面和球面接触时球心坐标是唯一确定的,因此滑动测微计测试系统把测标设置成锥面,探头与测标接触的部位设置为球面(球形头),据此在测试时获得高精度和

高重现性的定位。测试时,探头被拉长,使得上下两个球形头接触测标,即可准确测试两个测标之间的距离(变形)。测标和探头被设计成了四瓣,通过转动调节探头至滑动位置和测试位置,可实现探头在不同深度测标之间来回滑动和测试。

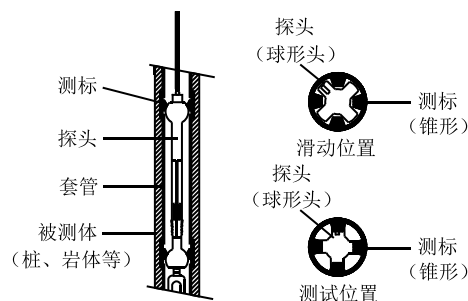


图1 滑动测微计测试原理

Fig.1 Principle of sliding micrometer

为了将测标埋设在被测体中,需要安装包含测标的测管。图2所示为当前国内常用的滑动测微计测管实物,包括套管和接头两部分。套管和接头为塑料材质;测标为金属材质,通过熔铸工艺嵌固在接头当中。套管与接头相互连接形成测管,测标的间距约1 000 mm,因此滑动测微计可以达到 $\pm 3 \times 10^{-6}$ 的应变测试精度。工程中的测管安装,即是要将套管与接头相互连接至需要长度,埋设于被测体(桩、大坝、岩体等)当中。对于灌注桩桩基内力测试,则是将测管绑扎在钢筋笼主筋上,随钢筋笼吊放入桩孔中,灌注混凝土将测管浇筑在桩身当中(一般沿桩身通长埋设);测管底端和顶端用堵头和顶盖封口,测管内部形成相对封闭的空间。

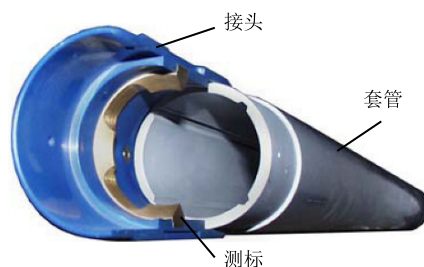


图2 滑动测微计测管

Fig.2 Slide micrometer tube

2.2 桩基内力测试的测管埋设环境

从上述原理可以看出,要使滑动测微计达到较好的变形测试精度,需要满足两个关键条件:一是测标表面保持清洁,细小的杂质附着都可能引起不可接受的测试误差;二是测标要与桩身混凝土位移协调一致。对于杂质附着引起的测试误差,根据球

面与锥面的接触关系,结合滑动测微计的测标间距,可得

$$\Delta \varepsilon = \frac{1\,000t}{\sin \alpha} \quad (1)$$

式中: $\Delta \varepsilon$ 为杂质引起的最大测试误差 (10^{-6}); t 为附着在测标表面的杂质厚度 (mm); α 为测标锥面母线与轴线的夹角。如测标表面即使仅附着 0.1 mm 厚度杂质,测标锥面母线与轴线的夹角按 45° 计算,则杂质引起的最大测试误差可达 141×10^{-6} ,已是不能被桩基内力测试所接受的误差。

在工程现场,引起测标污染的原因主要是测管外的泥浆或混凝土浆液通过渗透进入测管。增强测管的防渗性能,以及减小测管内外的水压力差均有助于减小进入测管的杂质数量。如图 2 所示,测管中可能引起渗漏的位置主要包括 2 处,分别是套管与接头的接触界面,以及测标与接头的接触界面。对于套管与接头界面,厂家提供了 O 型圈防渗,如图 3 所示;《滑动测微测试规程》^[3] 基于工程实践经验,提出了在界面上涂抹胶水,在套管与接头的连接处缠防水胶带增强防渗的措施。对于测标与接头界面,由于担心影响测标与混凝土的位移协调,工程中一般不额外采取增强防水措施。对于减小测管内外的压力差,在测管中注入清水是一个办法。总的说来,目前工程中采取防止测标污染或者防止测管外杂质通过渗流进入测管的措施包括:设置 O 型圈、涂胶、缠胶带和测管内注水。

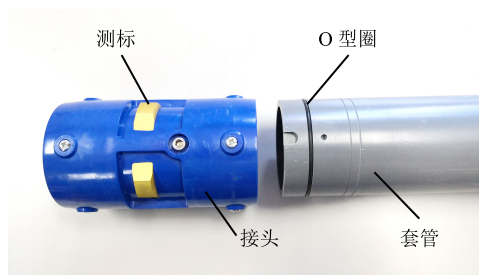


图 3 测管自带的防渗措施
Fig.3 Initial anti-seepage measure of tube

对于测管内外的水压力差,由于不同桩孔内地下水位或护壁泥浆液面高低不同,混凝土的流动性存在差异等原因,使得工程现场可能出现测管内压力大于测管外压力(内压大于外压)的情况,也可能出现外压大于内压的情况。

总的来说,研究测管上述不同防水措施和不同压差条件下的渗流响应,对指导工程现场测管的高质量埋设,分析评估现场某些现象后面的本质及其影响具有重要意义。

3 滑动测微管抗渗能力测试装置

3.1 测试装置设计的理论基础

定量试验测管不同防水措施和不同压差条件下的渗流响应,无适宜的现成仪器,为此专门设计和制作一套测试装置。

根据流体力学有关理论,容器壁上开孔,流体经孔口流出的水力现象称为孔口出流。孔口出流的流量公式为^[18]

$$Q = \mu A \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad (2)$$

式中: Q 为流量; A 为孔口面积; Δp 为孔口的进出口压强差; ρ 为流体密度; μ 为流量系数,根据孔口类型取值。

从式 (2) 中可以看出,流量与压强差(压差)单调正相关,已知流量和压差可以求得孔口的大小及其变化。因此,测试装置需要具有控制压差和测试液体流量的功能。

3.2 滑动测微管抗渗能力测试装置

基于上述理论,设计了如图 4 所示的滑动测微管抗渗能力测试装置,该装置能够实现在滑动测微管内外产生最大 1 MPa 的压差,并可测试不同压力差下水的渗漏量,装置主要包括以下几个部分:

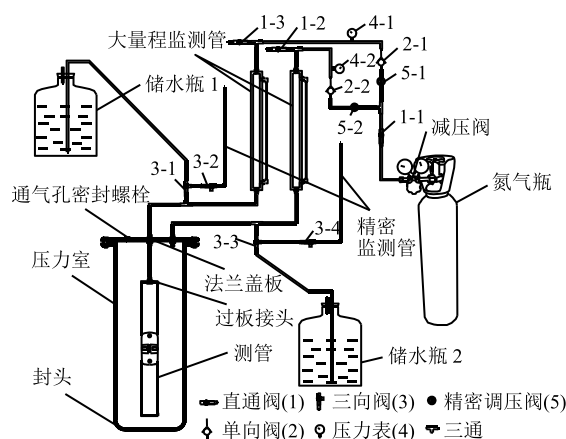


图 4 滑动测微管抗渗能力测试装置
Fig.4 Testing device for anti-seepage ability of sliding micrometer tube

(1) 压力室。依据标准《压力容器》(GB150—2011)^[19]设计,为壁厚为 1 cm,外径为 30 cm,高度为 100 cm 的腔体,两端开口处分别焊接有法兰和封头;密封采用法兰加垫圈组合,可承受 5 MPa 压力;法兰盖板上设置有通气孔和内外压力气管,其中内压气管与测管连接,外压气管与压力室相通。

(2) 测管。主要由套管、接头(含测标)、堵头

和过板接头组成, 试验用套管长为 30 cm; 堵头设置在测管两端, 并用强力胶进行密封; 过板接头接在堵头上, 在堵头两侧通过高压密封垫圈进行密封。

(3) 压力控制系统。采用高纯氮气瓶作为压力源, 气源压力为 12.5 MPa, 氮气瓶口处安装有减压阀, 可控制出口处的压力值。通过设置两组精密调压阀和压力表的组合来分别控制压力室和测管内的压力, 形成不同工况的压力差。精密调压阀量程为 0.01~1.00 MPa, 灵敏度在 0.2% 以内, 压力表量程为 1.60 MPa、0.25 级精度。

(4) 渗水量测量系统。包括两个大量程监测管和两个精密监测管, 当渗流量较大时使用大量程监测管, 渗流量较小时使用精密监测管, 监测管可分别测量压力室与测管中的水量变化; 大量程监测管内径为 3.00 cm, 外部通过直角弯头连接有透明尼龙管, 尼龙管与监测管内部联通, 监测管外侧与尼龙管平行方向贴有刻度标, 可直接读出监测管中的水位, 分辨精度为 0.35 mL; 精密监测管为一根内径为 4.0 mm 的透明尼龙管, 分辨精度可达到 0.006 3 mL。

4 试验方案及试验方法

4.1 试验工况

本试验所用滑动测微管为国内常用的测管, 套管外径为 64.0 mm, 内径为 56.0 mm, 设计承受压力为 1.0 MPa, 实物见图 3 和图 5。

为了评价各种防水方式的有效性, 本试验共在套管与接头界面设置了 3 种防水措施的对比试验, 具体如下:

第 1 种: 仅利用测管自身 O 型圈进行防水;

第 2 种: 在第 1 种防水措施基础上, 在套管与接头连接缝隙处缠高压绝缘自粘带和 PVC 电器阻燃胶带各两层 (外观和图 5(b) 一致);

第 3 种: 先在套管与接头连接的缝隙处涂抹“U-PVC 硬塑专用胶”, 再在套管与接头连接缝隙处缠“高压绝缘自粘带”和“PVC 电器阻燃胶带”各两层, 如图 5 所示。

每种防水措施都进行了外压大于内压和内压大于外压两种工况的试验, 试验中分别记录不同压差下的渗流量。具体试验方案如表 1 所示。该试验方案包括了 3 种防水措施、两种试验工况 (外压大于内压和内压大于外压)、不同压差级别的试验, 压力范围覆盖了套管的设计承压能力范围。

4.2 试验方法

4.2.1 测试准备

试验开始前进行装置气密性测试, 确保整个系

统在设计压力条件下气密性良好。将测管放入压力室内 (见图 6), 然后将压力室、测管注满清水, 并将监测管内的水位调整到读数范围。

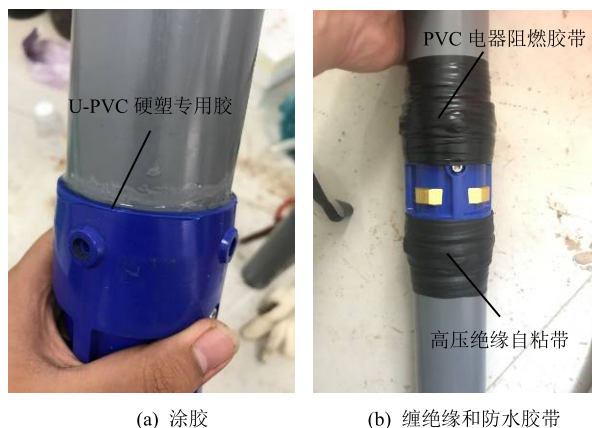


图 5 防水措施构成

Fig.5 Composition of waterproofing measures

表 1 试验方案

Table 1 Test scheme

试验编号	防水措施	试验工况	压差增量 /kPa	测量内容
1a	第 1 种	增加外压, 内压恒为 0 kPa	50	不同压差的渗流量
1b	第 1 种	增加内压, 外压恒为 0 kPa	20	
2a	第 2 种	增加外压, 内压恒为 0 kPa	50	
2b	第 2 种	增加内压, 外压恒为 0 kPa	20	
3a	第 3 种	增加外压, 内压恒为 0 kPa	50	
3b	第 3 种	增加内压, 外压恒为 0 kPa	50	



图 6 试验现场照片

Fig.6 Test photos

4.2.2 外压大于内压的试验

试验过程中控制测管内压为 0 kPa, 逐级增大压力室内压力, 每级稳定后记录一定时间内的渗水量。

具体操作过程如下:

(1) 打开气瓶的阀门, 调节精密调压阀 5-2 并观察压力表 4-2 读数, 使压力差达到第 1 级压力, 稳定 10 min 后, 记录连接测管的监测管的水位读数, 经过 1 min 后, 再次记录水位读数, 得到 1 min 时间内渗水量。

(2) 继续调节精密调压阀 5-2 使压力差达到第 2 级, 稳定 10 min 后, 记录连接测管的监测管的水位读数, 经过 1 min 后, 再次记录水位读数, 得到 1 min 时间内渗水量。

(3) 依次逐级增大至压力室压力为 950 kPa, 各级压力下稳定 10 min 后, 记录 1 min 时间内渗水量。

4.2.3 内压大于外压的试验

与前述外压大于内压试验类似, 试验过程中控制压力室压力为 0 kPa, 调节精密调压阀 5-1 逐级增大测管内压力, 每级加压经 10 min 稳定后记录 1 min 时间内的渗水量。若试验过程中出现水位突然异常增大的情况则停止试验, 此时已发生测管内水位低于套管接头, 发生气体从渗漏处溢出的情况。

表 1 中所有试验采用同一根测管, 试验顺序为 1a→1b→2a→2b→3a→3b。

5 试验结果与分析

不同压差作用下“外压大于内压”工况 (“外压大”工况) 3 种防水措施的渗流量见图 7。由图 7 可知, 3 种防水措施下均发生了渗流, 但渗流量总体较小, 第 1 种防水措施下 950 kPa 压差范围内最大渗流量不超过 1.00 mL/min, 第 2 种防水措施下不超过 0.50 mL/min, 第 3 种防水措施下最大渗流量不超过 0.10 mL/min。

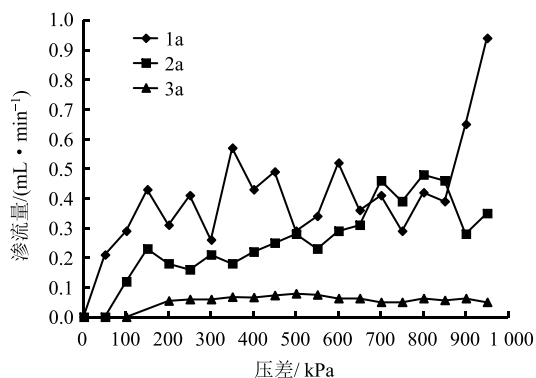


图 7 外压大于内压下 3 种防水措施的渗流量随压差变化
Fig.7 Changes of seepage flow with pressure difference of three waterproofing measures under external pressure over internal pressure

当压差不超过 650 kPa 时, 第 2 种防水措施较

第 1 种防水措施效果要好, 但当压力在 650~850 kPa 时, 两种防水措施效果相近, 可见, 缠高压绝缘自粘带和 PVC 电器阻燃胶带仅可提高低压差下的防水效果, 当压差较高时, 两种防水措施的差异不大。

第 3 种防水措施的效果远远好于前两种, 压差小于 200 kPa 时基本不发生渗流, 当压差高于 200 kPa 时, 渗流量基本稳定, 维持在 0.07 mL/min 左右。

不同压差作用下“内压大于外压”工况 (“内压大”工况) 3 种防水措施的渗流量如图 8 所示。从图中可以看出, 该工况下的渗流量要远大于“外压大”工况, 各试验终止时由于测管内水的排出, 水位均下降超过了套管接头位置。同时可看出 3 种防水措施的效果差异性较大, 前两种防水措施下随着压差的增大, 排水量呈指数型增长, 在压差很小的情况下 (第 1 种为 60 kPa, 第 2 种为 40 kPa) 就已经超过 10 mL/min。在 100 kPa 的压差作用下, 第 1 种防水措施的渗流量达到了 160 mL/min, 第 2 种防水措施的渗流量达到 60 mL/min。相比于前两种防水措施, 第 3 种防水措施的渗流量随着压差增长缓慢, 当压差为 100 kPa 时, 渗流量不超过 0.03 mL/min, 当压差增长到 650 kPa 时, 渗流量不超过 4 mL/min。

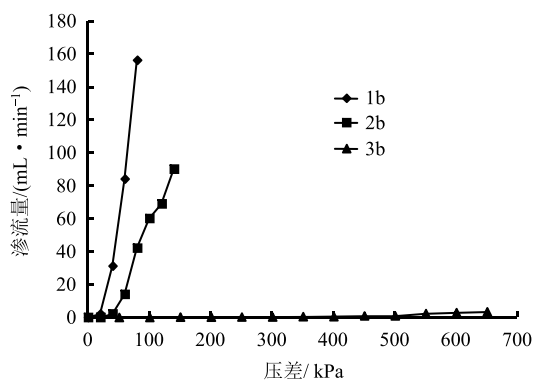


图 8 内压大于外压下 3 种防水措施的渗流量随压差变化
Fig.8 Changes of seepage flow with pressure difference of three waterproofing measures under internal pressure over external pressure

为再次确认第 3 种防水措施的防水效果, 另外制作一根测管, 增加了一组平行试验 4a、4b (试验顺序为 4a→4b), 4a 与 4b 均采用第 3 种防水措施, 4a 为“外压大”工况, 4b 为“内压大”工况。3a 和 4a, 3b 和 4b 的试验结果对比见图 9 和图 10。由图可知, 两根测管所表现出的规律基本一致, 但第 2 根测管的渗水量要略大于第 1 根, “外压大”工况, 4a 试验的渗水量约为 3a 的两倍, 但最大渗水量不超过 0.25 mL/min; “内压大”工况, 压差达到 500 kPa 时, 两根测管的渗水量都发生了陡增, 是一个临界压差

点, 该临界压差点以内的渗水量不超过 2 mL/min。

为了确定第 3 种防水措施下测管的渗漏位置, 对第 2 根测管进行了压力室外的“内压大”工况试验, 发现渗漏主要发生在金属测标与套管接头结合处, 压力在 200 kPa 时, 肉眼就能观察到渗水, 压力到 300 kPa 时渗漏非常明显, 而套管与接头连接处未发现渗漏, 如图 11 所示。

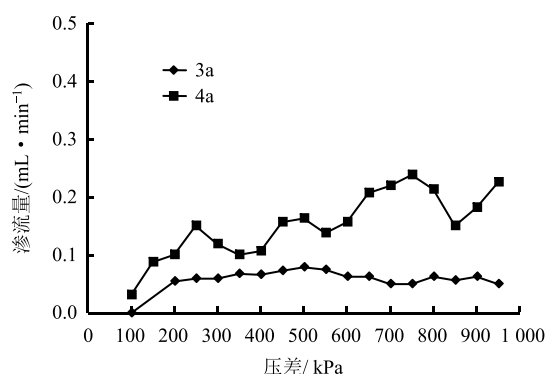


图 9 外压大于内压第 3 种防水措施的渗流量随压差变化
Fig.9 Changes of seepage flow with pressure difference of the third waterproofing measure under external pressure over internal pressure

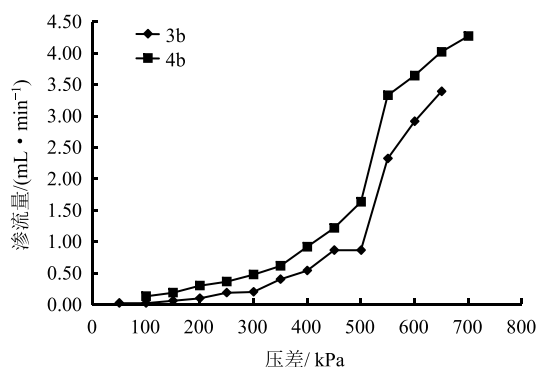


图 10 内压大于外压第 3 种防水措施的渗流量随压差变化
Fig.10 Changes of seepage flow with pressure difference of the third waterproofing measures with internal pressure over external pressure



(a) 压力为 200 kPa

(b) 压力为 300 kPa

图 11 渗漏位置试验
Fig.11 Testing leakage point

6 讨论与建议

上述试验说明在测管安装过程中完全不发生渗漏是很难实现的, 鉴于工程上已有不少试验获得成功, 说明有一定量的渗漏是允许的, 我们需要做的是尽可能减小“从外向内”的渗漏量。根据测试结果, 第 3 种防水措施 (O 型圈+涂胶+缠胶带) 的防水效果要远好于第 1 种 (O 型圈) 和第 2 种 (O 型圈+缠胶带)。鉴于第 3 种措施在工程实践中也易于实施, 建议埋设测管时均采用第 3 种措施防水, 现基于第 3 种措施第 2 根测管 (偏保守) 的有关测试数据 (图 9 和图 10 中的 4a 和 4b) 进行有关讨论。

6.1 渗水通道直径

根据试验结果, 第 3 种防水措施的渗漏位置只在测标与接头接触界面, 该位置处存在渗水通道, 为了解渗水通道的大致直径, 确定什么粒径范围的颗粒可以通过通道, 做如下假定和近似: ①渗水通道为圆锥形管; ②内压大于外压时, 孔口按收缩圆锥形管嘴考虑 (流量系数 μ 近似取 0.95); ③外压大于内压时, 孔口按扩张圆锥形管嘴考虑 (流量系数 μ 近似取 0.45^[18]); ④测标与套管接头界面共具有 8 个漏点 (根据图 11 确定), 且各漏点尺寸相同。

依据上述假定和近似, 根据式 (2) 可以反算孔口面积 A , 进而得到渗水通道的直径 d 。代入图 9 和图 10 中 4a 和 4b 的试验数据, 得到渗水通道的直径见图 12。

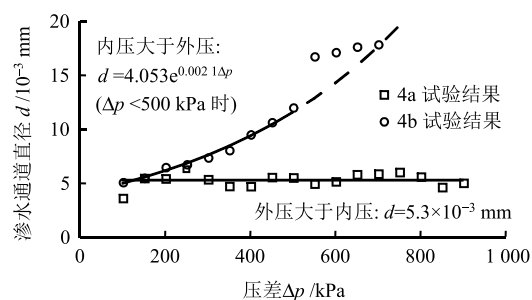


图 12 渗水通道直径

Fig.12 Diameter of seepage channel

从图 12 中可以看出, 渗水通道的原生 (出厂最初状态, 图 12 中压差较小时) 直径不超过 0.005 mm, 即仅能有小于 0.005 mm 的颗粒通过测管, 该数值和滑动测微计的测试精度在同一个数量级。但需要指出的是, 前述假定渗水通道为圆锥形管只是为了方便计算, 可能并不符合实际, 因为测标为环形金属, 渗水通道很可能是长度比宽度大得多的“缝”, 可以通过测管颗粒的直径必定小于“缝”的宽度。因此, 上述 0.005 mm 应是一个比较保守的尺寸数据。

由图 12 还可以看出,当“外压大”时,压差在不超过 1 000 kPa 范围内变化,渗透通道的直径基本无变化;但当“内压大”时,小压差(<150 kPa)时计算得到的渗透通道“直径”和外压大时接近,但随着压差增加,渗透通道的“直径”也在增加(压差小于 500 kPa 时,可用指数函数表达),在达到 500 kPa 时,甚至有个突变。表明“外压大”时,压差增大对渗透通道的尺寸基本无影响;而“内压大”时,会拓宽渗透通道。基于前述分析,测管接头处的流量为

$$Q = 2\pi\mu d^2 \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad (3)$$

直径 d (10^{-3} mm) 为

$$d = \begin{cases} 5.3(\Delta p < 1\,000 \text{ kPa 且 外压大}) \\ 4.053e^{0.002\,1\Delta p} (\Delta p < 500 \text{ kPa 且 内压大}) \end{cases} \quad (4)$$

内压大时 μ 取 0.95, 外压大时 μ 取 0.45。“内压大”时流量系数更大,渗透通道更宽,是导致其渗流量大于“外压大”工况渗流量的原因。

6.2 测管安装现场环境条件分析

分析两个灌注桩测管安装关键时刻的压差,分别是测管刚放入桩孔内和混凝土刚灌注结束时,影响压差的主要环境因素分别是地下水位或护壁泥浆的高度,以及新浇注混凝土的自重应力。

6.2.1 桩孔内新浇注混凝土自重应力公式

桩孔内新浇注混凝土为非牛顿流体,其自重应力不是重度与深度的乘积,主要原因是混凝土与桩周土界面存在切应力 τ (如图 13 所示), τ 可由下式计算^[20]:

$$\tau = c + k\sigma \quad (5)$$

式中: c 为黏滞力; k 为侧压力系数与摩擦系数的乘积; σ 为竖向应力。

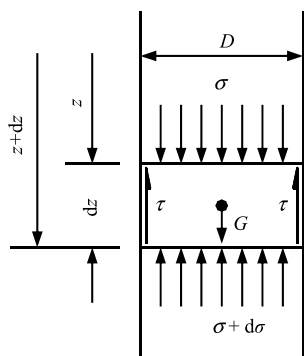


图 13 桩孔内混凝土受力分析

Fig.13 Analysis of concrete stress in pile hole

根据图 13 所示桩孔内 dz 厚度新浇注混凝土的

受力图,可得平衡方程:

$$\frac{\sigma\pi D^2}{4} + \frac{\gamma\pi D^2}{4} dz = \frac{(\sigma + d\sigma)\pi D^2}{4} + (c + k\sigma)\pi D \cdot dz$$

整理得

$$\frac{d\sigma}{dz} + \frac{4k}{D}\sigma = \gamma - \frac{4c}{D} \quad (6)$$

可解得桩孔内新浇注混凝土的自重应力公式为

$$\sigma = \frac{\gamma D - 4c}{4k} (1 - e^{-\frac{4k}{D}z}) \quad (7)$$

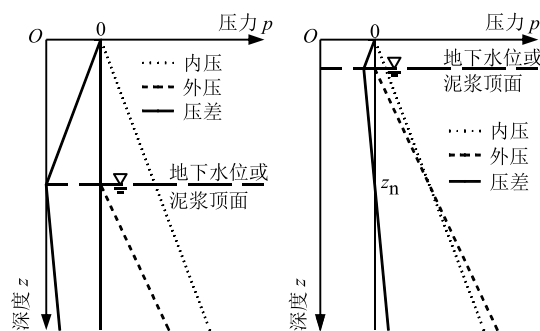
式中: D 为桩孔直径; γ 为混凝土重度; z 为深度。

6.2.2 测管安装压差分析及其启示

(1) 地下水位或护壁泥浆液面高度对压差的影响。

分析测管刚放入桩孔内的压差,内外压分为清水和泥浆形成的水压力。如图 14(a)所示,当桩孔内液面高度低时,向测管内注入清水,增加测管内水头,容易使得内压大于外压,此时渗透方向从上到下均为从内向外,不会有测管外杂质进入测管内。但根据图 10 和图 12 结果,压差增大时可能导致渗透通道拓宽,进而导致混凝土灌注时更大粒径的颗粒可以通过测管,于防止测标污染不利,所以此时应控制测管内的水头高度,即水头高度不是越高越好,而是能使得内压略大于外压为宜,特别是不宜出现压差大于 500 kPa (渗透通道“直径”陡增)的情况。

如图 14(b)所示,当液面较高时,测管内注满水将出现上部内压大,下部外压大的情况,渗流方向在上部是由内向外,下部由外向内,由于泥浆的重度比水大不了太多,测管内外压差和渗流量总体不大;当由外向内渗流量更多,导致测管内水位上升时,密封测管顶部限制水和气的流出有利于减少水的渗入量(具体原理见图 15 及其相关解释)。



(a) 液面低时的压差

(b) 液面高时的压差

图 14 桩孔内液面高度对压差的影响

Fig.14 Influence of liquid level on pressure difference

(2) 混凝土摩擦指标对压差的影响。从式(7)可以看出,除 γ 外, D 、 c 和 k 均影响着桩孔内混凝土的自重应力,自重应力随 D 的减小, c 和 k 的增大而减小,本文将 c 和 k 称为混凝土的摩擦指标。混凝土流动性越好,塌落度越高,性质越接近于牛顿流体,摩擦指标越小;反之则混凝土性质越接近于固体,摩擦指标越大。

分析混凝土刚灌注结束时的压差,内压为清水形成的水压力,外压为混凝土自重应力。当摩擦指标较小且测管内充满清水时,测管内外的压力和压差(外压减内压)见图15,初始情况如图15(a)所示,桩身上下均处于“外压大于内压”状态,压差为正值,渗流从测管外流入管内,按图中所列参数(摩擦指标参照《混凝土泵送施工技术规范》(JGJ/T 10—2011)^[21]估计,混凝土重度取 24 kN/m^3)和式(3),可计算得总渗流量为 12.6 mL/min ,如果测管顶没有限制水溢出的措施(测管顶自由),则测管内每分钟有 5.1 mm 长度的水溢出;但若测管顶有限制水溢出的措施(测管顶限制),则测管内水压会增加,使压差在上部变为负值,如图15(b)所示,此时渗流方向在下部(图中 z_n 深度以下, z_n 为临界深度)为由外向内,上部为由内向外,且流入等于流出达到平衡,按图中所列参数可计算得流入量为 6.14 mL/min ,约为图15(a)的一半,因此摩擦指标低时测管顶采取措施限制测管内水的溢出,有助于提高测管安装质量。由于相同压差(绝对值)下,“内压大”向外的渗流量大于“外压大”向内的渗流量,因此图15(b)中流出与流入转换的临界深度 z_n 将出现在桩的中上部。

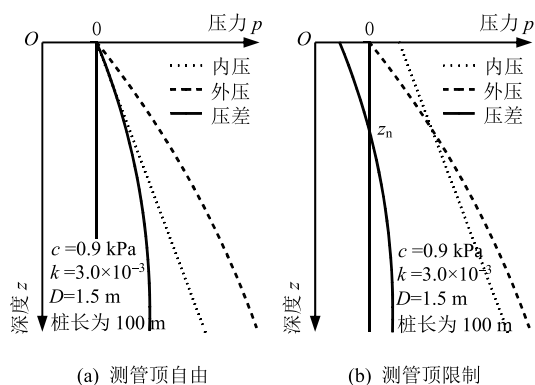


图15 高流动性混凝土的测管压差
Fig.15 Pressure difference of high fluidity concrete

当摩擦指标较大且测管内充满清洁水时,测管内外的压力和压差见图16,初始情况如图16(a)所示,由于下部桩体混凝土受桩周土作用的切应力较

大,使得下部桩体混凝土的自重应力比测管内水压还小,压差为负值,此时渗流方向在上部为由外向内流入,下部为由内向外流出,采用图中所列参数可计算流入量为 3.4 mL/min ,流出量为 7.2 mL/min ,若测管顶水气可自由出入(测管顶自由),则综合效应是有 3.8 mL/min 的流量流出,即每分钟测管内水头将下降 1.5 mm ;但若在测管顶限制水气的进出(测管顶限制),则会出现如图16(b)的情况,此时测管顶将出现负压,测管内外压差发生变化,力图使水的流入量等于流出量,如按图中参数,测管顶产生 -46 kPa 负压时,流入量等于流出量,为 4.8 mL/min ,较图16(a)的流入量有所增加,因此摩擦指标较大时在测管顶限制水气出入,对提高测管安装质量不利,此时宜保持测管顶有进气通道或间隔一定时间打开测管顶盖释压。此外,测管顶产生的负压在量值上不可能超过大气压强,当负压达到大气压强仍不能使水的流入与流出平衡时,则测管内水位将持续下降。

工程界当前对桩孔内摩擦指标的测试不多,实际工程中暂时还难以进行混凝土灌注后测管内外压差的准确分析,但可根据实际发生的现象采取相应对策减少含杂质水由外向内的渗入量,提高测管埋设质量。混凝土灌注后若测管内出现水向外溢,则表明出现图15所示情况,此时应对测管顶进行密封,增加内压;若出现测管内水位下降,则表明出现图16情况,此时应使测管顶有进气通道或间歇性打开测管顶盖释(负)压。

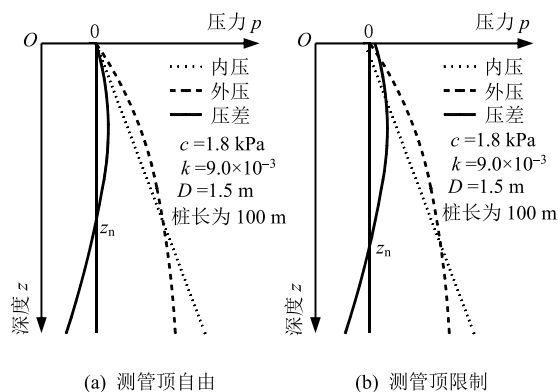


图16 低流动性混凝土的测管压差
Fig.16 Pressure difference of low fluidity concrete

7 结 论

(1) 本文设计和制作的滑动测微管抗渗能力测试装置能够实现对测管内外不同压差的控制,以及不同压差下渗流量(内渗和外渗)的定量测量。

(2) O 型圈和缠胶带措施不足以使测管具有良好抗渗性能, 再增加涂胶措施可使得测管抗渗性能大大改善, 达到套管和接头连接界面至少 950 kPa 压差作用下不透水的良好效果。

(3) 测标与接头连接界面存在渗流通道, 在相同压差作用下发生的渗流, “内压大”从内向外产生的渗流量要远大于“外压大”从外向内的渗流量; “内压大”时流量系数更大, 渗流通道更宽是导致该现象的原因。正常情况下不会有直径超过 0.005 mm 的颗粒通过渗透通道。基于试验得到的流量公式可用于估算通过渗流通道的流量。

(4) 灌注桩桩身内力测试, 测管随钢筋笼下放桩孔过程中, 向测管内注水形成高于测管外水压力的水头差时, 需控制测管内水头的高度, 避免压差过大拓宽渗透通道, 尤其不应使压差大于 500 kPa。

(5) 不同流动性的混凝土, 其在桩孔内自重应力的不同, 导致混凝土灌注结束后测管压差具有差别, 从而产生不同类型的渗透。当测管内出现水向外溢出时测管顶部宜密封, 反之出现测管内水位下降时宜开放测管顶部释压。

参考文献

- [1] 陈尚桥. 用滑动测微计实测桩的荷载传递函数[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(7): 1267-1271.
CHEN Shang-qiao. Measuring the load-transfer functions of piles by using sliding micrometers[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(7): 1267-1271.
- [2] 中国建筑科学研究院. JGJ 106—2014 建筑基桩检测技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
China Academy of Building Research. JGJ 106—2014 Technical code for testing of building foundation piles[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014.
- [3] 机械工业勘察设计研究院. CECS 369: 2014 滑动测微测试规程[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.
China JK Institute of Engineering Investigation and Design Co. Ltd. CECS 369: 2014 Specification for test of sliding micrometer[S]. Beijing: China Planning Press, 2014.
- [4] KOVARI K, AMSTAD C, GROB H. Displacement measurements of high accuracy in underground openings[J]. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**, 1974(3): 13.
- [5] KOVARI K, AMSTAD C, FRITZ P. Integrated measuring technique for rock pressure determination[C]//*Proceedings of International Symposium on Field Measurements in Rock Mechanics*. Rotterdam: A A Balkema, 1977: 289-316..
- [6] KOVARI K, AMSTAD C. Fundamentals of deformation measurements[C]//*Proceedings of International Symposium on Field Measurements in Geomechanics*. [S. l.]: [s. n.], 1983.
- [7] 李光煜. 国外岩体变形测量技术[J]. 岩石力学与工程学报, 1982, 1(1): 117-130.
LI Guang-yu. Foreign rock deformation measurement technology[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1982, 1(1): 117-130.
- [8] 李光煜, 汪彬. 钢管桩负摩阻力及水平位移的测定[J]. 岩土力学, 1988, 9(2): 89-98.
LI Guang-yu, WANG Bin. Determination of negative friction and horizontal displacement for steel pipe piles[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 1988, 9(2): 89-98.
- [9] 李光煜, 黄粤. 大坝应变监测中的线法原理及便携式系列仪器[C]//中国水力发电工程学会大坝安全监测专业委员会年会暨学术交流会论文集. 北京: 中国水力发电工程学会, 2000.
LI Guang-yu, HUANG Yue. Principle of line method and portable series instruments in dam strain monitoring[C]//*Annual Meeting and Academic Exchange Meeting of Dam Safety Monitoring Committee of China Hydropower Engineering Society*. Beijing: China Society for Hydropower Engineering, 2000.
- [10] 李光煜, 黄粤. 岩土工程应变监测中的线法原理及便携式仪器系列[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(1): 99-109.
LE Guang-yu, HUANG Yue. Linewise observation and portable instruments on strain monitoring in geomechanics[J]. **Chines Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2001, 20(1): 99-109.
- [11] 陈尚桥. 用滑动测微计实测桩的荷载传递函数[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(7): 1267-1271.
CHEN Shang-qiao. Measuring the load-transfer functions of piles by using sliding micrometers[J]. **Chines Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(7): 1267-1271.
- [12] 覃卫民, 孙役, 陈润发, 等. 全站仪和滑动测微计在水布垭地下厂房监测中的应用[J]. 岩土力学, 2008, 29(2): 557-561.
QIN Wei-min, SUN Yi, CHEN Run-fa, et al. Application of total station instrument and sliding micrometer to

- monitoring Shuibuya underground powerhouse[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(2): 557-561.
- [13] 王庶懋, 吴刚, 于荣林, 等. 滑动测微计在桩基内力测试中的应用[J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(增刊 2): 1708-1711.
- WANG Shu-mao, WU Gang, YU Rong-lin, et al. Application of sliding micrometer in stress test of pile foundation[J]. **Chinese Journal of Underground Space and Engineering**, 2009, 5(Suppl. 2): 1708-1711.
- [14] 王遇国, 梅志荣, 张季超. 单桩承载性状试验研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(1): 7-11.
- WANG Yu-guo, MEI Zhi-rong, ZHANG Ji-chao. Experimental researches on bearing characteristics of a single pile[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2010, 32(1): 7-11.
- [15] 覃卫民, 赵刚, 周伟江. AM 扩底桩在静载试验中的应变测试分析[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(增刊 2): 101-104.
- QIN Wei-min, ZHAO Gang, ZHOU Wei-jiang. Strain of AM bottom-expanded piles in static loading tests[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2011, 33(Suppl. 2): 101-104.
- [16] 武学毅, 熊成林, 袁培进, 等. 滑动测微计在地下洞室围岩稳定中的应用研究[J]. 中国三峡, 2013(12): 41-43.
- WU Xue-yi, XIONG Cheng-lin, YUAN Pei-jin, et al. Application of sliding micrometer in stability of surrounding rock of underground cavern[J]. **China Three Gorges**, 2013(12): 41-43.
- [17] 薛守宁, 邓建辉, 张正虎. 基于滑动测微计的地下厂房围岩变形分析[J]. 人民长江, 2014, 45(增刊 2): 156-159.
- XUE Shou-ning, DENG Jian-hui, ZHANG Zheng-hu. Surrounding rock deformation of underground powerhouse based on sliding micrometer[J]. **Yangtze River**, 2014, 45(Suppl. 2): 156-159.
- [18] 陈长植. 工程流体力学[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2008.
- CHEN Chang-zhi. Engineering fluid mechanics[M]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology Press, 2008.
- [19] 全国锅炉压力容器标准化技术委员会. GB150—2011 压力容器[S]. 北京: 中国质检出版社, 2012.
- China Standardization Committee on Boilers and Pressure Vessels. GB150 — 2011 Pressure vessels[S]. Beijing: China Quality Inspection Press, 2014.
- [20] 严裕民. 可泵性混凝土在输送管中的应力状态[J]. 工程机械, 1986(3): 17-20.
- YAN Yu-min. Stress state of pumpable concrete in delivery pipe[J]. **Construction Machinery and Equipment**, 1986(3): 17-20.
- [21] 中国建筑科学研究院. JGJ/T 10—2011 混凝土泵送施工技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- China Academy of Building Research. JGJ/T 10—2011 Technical specification for construction of concrete pumping[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.

上接第 2493 页

- [17] 王学滨, 马冰, 潘一山, 等. 巷道围岩卸荷应力波传播及垮塌过程模拟[J]. 中国矿业大学学报, 2017, 46(6): 1259-1266.
- WANG Xue-bin, MA Bing, PAN Yi-shan, et al. Numerical simulation of the stress wave propagation and collapsing process of the tunnel surrounding rock[J]. **Journal of China University of Mining & Technology**, 2017, 46(6): 1259-1266.
- [18] MUNJIZA A. The combined finite-discrete element method[M]. London: John Wiley and Sons, 2004.
- [19] LISJAK A, TATONE B S A, GRASSELLI G, et al. Numerical modelling of the anisotropic mechanical behaviour of Opalinus clay at the laboratory-scale using FEM/DEM[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2014, 47(1): 187-206.
- [20] 赵毅鑫, 刘斌, 杨志良, 等. 神东矿区不同赋存深度沉积岩抗拉强度与断裂韧性研究[J]. 煤炭学报, 2019, 44(6): 1732-1741.
- ZHAO Yi-xin, LIU Bin, YANG Zhi-liang, et al. Tensile strength and fracture toughness of sedimentary rocks at different buried depths in Shendong coal field[J]. **Journal of China Coal Society**, 2019, 44(6): 1732-1741.

《岩土力学》2019 年第 4 期被 EI 收录论文 (45 篇, 收录率 100%)

序号	论文题名	作者	页码
1	平台巴西圆盘研究综述及三维启裂点研究	吴顺川, 马 骏, 程 业, 等	1239—1247
2	开孔管桩复合地基排水固结解析解	唐晓武, 杨晓秋, 俞 悦	1248—1254
3	基于平面应变统一强度公式的结构性黄土填料挡墙地震被动土压力研究	邵生俊, 陈 菲, 邓国华	1255—1262
4	微倾斜场地中地铁地下结构周围地基液化与变形特性振动台模型试验研究	庄海洋, 付继赛, 陈 苏, 等	1263—1272
5	考虑荷载与浸水条件的预崩解炭质泥岩变形与强度试验	付宏渊, 刘 杰, 曾 铃, 等	1273—1280
6	考虑卸荷作用的黄土湿陷性评价方法研究	王铁行, 金 鑫, 罗 扬, 等	1281—1290
7	沙漠微生物矿化覆膜及其稳定性的现场试验研究	李 驰, 王 硕, 王燕星, 等	1291—1298
8	考虑卸荷速率的 K_0 固结膨胀土应力-应变行为	李新明, 孔令伟, 郭爱国	1299—1306
9	粉土中筒型基础贯入阻力的研究	马文冠, 刘 润, 练继建, 等	1307—1312
10	土体三维卸荷弹塑性模型及其试验验证	张坤勇, 臧振君, 李 威, 等	1313—1323
11	车辆载重与动荷载对 X 形桩桩-网复合地基动力特性影响的试验研究	尹 锋, 周 航, 刘汉龙, 等	1324—1330
12	不同饱水度花岗岩的真三轴岩爆试验研究	罗丹旎, 苏国韶, 何保煜	1331—1340
13	考虑不同影响因素的砂岩损伤特征及其卸荷破坏细观特性研究	王 宇, 艾 芊, 李建林, 等	1341—1350
14	非饱和压实黄土结构特性试验研究	王娟娟, 郝延周, 王铁行	1351—1357
15	基于细观力学脆性岩石剪切特性演化模型研究	李晓照, 戚承志, 邵珠山, 等	1358—1367
16	基于相关函数理论的动模量和阻尼比计算新方法	梁 珂, 陈国兴, 何 杨, 等	1368—1376
17	二叠系炭质页岩软弱夹层剪切蠕变特性研究	朱赛楠, 殷跃平, 李 滨	1377—1386
18	含软弱夹层斜坡地震动力响应过程的边际谱特征研究	刘汉香, 许 强, 朱 星, 等	1387—1396
19	基于 GIS 的边坡稳定性计算方法研究	余 国, 谢谟文, 郑正勤, 等	1397—1404
20	块系岩体滑移失稳中低摩擦效应的理论与试验研究	蒋海明, 李 杰, 王明洋	1405—1412
21	部分排水时饱和粉质黏土变围压循环三轴试验研究	刘家顺, 王来贵, 张向东, 等	1413—1419
22	掺复合浆液堆石料压缩特性试验研究	王 涛, 刘斯宏, 郑守仁, 等	1420—1426
23	面板对加筋土挡墙影响的离心模型试验研究	徐 鹏, 蒋关鲁, 王 珣, 等	1427—1432
24	考虑起始水力坡降的天然非均质地基固结分析	金丹丹, 王 素, 李传勋	1433—1440
25	基于状态曲面的非饱和土强度准则及其验证	郑国锋, 郭晓霞, 邵龙潭	1441—1448
26	基于双电层模型冻土中未冻水含量理论推演及应用	靳 潇, 杨 文, 孟宪红, 等	1449—1456
27	基于颗粒接触状态理论的砂-粉混合料剪切波速试验	朱雨萌, 吴 琪, 陈国兴	1457—1464
28	基于对数几率回归模型的粗颗粒土颗粒破碎过程演化研究	丁建源, 陈晓斌, 张家生, 等	1465—1473
29	注 CO_2 条件下花岗岩破裂特征的试验研究	徐辰宇, 白 冰, 刘明泽	1474—1482
30	基于累积动应力水平的间歇加载下超孔压预测	夏唐代, 郑晴晴, 陈秀良	1483—1490
31	采动微地震波传播与衰减特性研究	雷文杰, 李金雨, 云美厚	1491—1497
32	浅覆盖层软质岩中抗拔桩承载特性现场试验研究	王钦科, 马建林, 胡中波, 等	1498—1506
33	堤坝脉动注浆浆液扩散机制及应用研究	张 聪, 梁经纬, 阳军生, 等	1507—1514
34	软土深开挖致地铁车站基坑及邻近建筑变形特性研究	刘念武, 陈奕天, 龚晓南, 等	1515—1525
35	渗流监测数据缺失处理与渗透稳定判断	徐 强, 肖 明, 陈俊涛, 等	1526—1534
36	基于现场双管试验确定弱透水层水力参数的方法	信亚雯, 周志芳, 马 筠, 等	1535—1542
37	高地温对隧道岩爆发生的影响性研究	严 健, 何 川, 汪 波, 等	1543—1550
38	水中超深大沉井施工期间侧压力现场监测研究	蒋炳楠, 马建林, 褚晶磊, 等	1551—1560
39	凸起地形对铁路环境振动的影响分析	卢华喜, 徐路遥, 梁平英, 等	1561—1568
40	基于 T-S 模糊故障树的地连墙+支撑支护基坑坍塌可能性评价	钟国强, 王 浩, 孔 利, 等	1569—1576
41	离心模型试验与数值模拟相结合研究采空边坡渐进破坏特性	李世俊, 马昌慧, 刘应明, 等	1577—1583
42	数值流形法中基于适合分析 T 样条的局部网格加密算法	刘登学, 张友良, 丁秀丽, 等	1584—1595
43	饱和砂土液化后大变形机制的离散元细观分析	魏 星, 张 昭, 王 刚, 等	1596—1602
44	重载铁路路基面动应力峰值随机分布特征研究	梅慧浩, 冷伍明, 聂如松, 等	1603—1613
45	隧道衬砌渗漏水病害模型试验系统的研制及应用	高成路, 李术才, 林春金, 等	1614—1622