

DOI: 10.16285/j.rsm.2016.03.036

三维注浆模型试验系统研制及应用

张伟杰¹, 李术才², 魏久传¹, 张庆松², 张 霄², 李志鹏², 谢道雷¹

(1. 山东科技大学 地球科学与工程学院, 山东 青岛 266510; 2. 山东大学 岩土与工程结构研究中心, 山东 济南 250061)

摘 要: 为研究注浆扩散规律和加固机制, 研制了三维注浆模型试验系统, 该系统由承载试验台、伺服稳压供水单元、注浆单元、多元信息监测单元及图像采集单元组成。该系统主要功能包括不同岩体介质中参数灵活可调的多孔注浆、多序次注浆模拟试验及被注岩体内部物理场信息实时采集, 其主要优势体现在: (1) 试验腔设计为组合桶式结构, 密封性强, 拆卸方便, 利于注浆加固体细部研究; (2) 多腔气动联合控制水压加载方式可提供持续稳压的地下水环境; (3) 多元信息并行实时监测系统可同时采集被注岩体内不同空间位置的总压力、孔隙水压力及位移等信息, 实现注浆过程中物理参量时空变化规律的研究。利用该试验系统进行黏土介质单孔注浆和多孔分序次注浆模拟试验, 获得注浆压力 p 变化特征及土体内部力学响应规律: $p-t$ 曲线呈多个波峰-波谷旋回, 表征劈裂注浆为主的加固模式; 注浆荷载作用下, 总压力、孔隙水压力、有效应力与注浆压力基本同步变化, 注浆结束点达到峰值, 其后开始衰减并逐渐趋于稳定; 与单孔注浆相比, 多孔、多序次注浆可显著提高土体有效应力, 黏土逐渐压缩固结, 力学性质改善。试验表明, 黏土介质以劈裂注浆为主, 不同序次浆脉间接触关系复杂, 可划分为剪切劈裂、原位顺层劈裂及入侵劈裂 3 种基本模式; 采用多孔、小注浆速率试验方法, 可减小围岩扰动, 增大注浆量及土体压缩固结程度, 提高注浆加固效果。研究成果对揭示黏土介质注浆机制具有一定的科学价值。

关 键 词: 三维注浆模型试验系统; 黏土介质; 单孔注浆试验; 多孔注浆试验; 实时监测

中图分类号: TU 457.5

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2016)03-0902-10

Development of a 3D grouting model test system and its application

ZHANG Wei-jie¹, LI Shu-cai², WEI Jiu-chuan¹, ZHANG Qing-song², ZHANG Xiao², LI Zhi-peng², XIE Dao-lei¹

(1. College of Earth Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266510, China;

2. Research Center of Geotechnical and Structural Engineering, Shandong University, Jinan, Shandong 250061, China)

Abstract: A 3D grouting model test system, which consists of bearing test rig, servo voltage supply unit, grouting unit, multivariate information monitoring unit and image acquiring unit, is developed to investigate the grouting diffusion process and reinforcement mechanism. The main functions of this system are the lacunose, multiple sequence and parameter flexible model test of the grouting and the real-time collection of the physics field information during the grouting. The major advantages of the system include: (1) The test cavity is designed as composite barrel structured, strong leak tightness and convenient disassembly, in favor of studying grouting solid details; (2) the loading method of multi-cavity control hydraulic pneumatic joint can provide continuous steady pressure groundwater environment; (3) a multi information parallel real-time monitoring system can collect the information of the total pressure, pore water pressure and displacement of different spatial positions in the injected rock body, and realize the spatial and temporal variation of physical parameters in the grouting process. The testing system is used to perform the simulation tests of single hole grouting and grouting in a single hole, and the variation of grouting pressure P and the mechanical response of soil are obtained. The $p-t$ curve shows multiple peak - trough cycle and characterizes strengthening mode of splitting grouting. The total pressure, pore water pressure, effective stress and grouting pressure change almost synchronously under the grouting loading; reach the peak values at the end point of grouting, and then begin to attenuate and gradually to be stabilized. Compared with single-hole grouting method, the multi-hole grouting method can improve the effective stress of soil dramatically. It is demonstrated that fracturing grouting is the main clay medium. The contact relationship between different orders of slurry veins is complex, and can be divided into 3 basic

收稿日期: 2014-11-03

基金项目: 国家自然科学基金 (No.41372290, No.51509148); 山东省自然科学基金 (No.BS2015NJ010); 中国博士后科学基金 (No.2015M572066); 博士点基金博导课题项目 (No.20133718110003)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (41372290, 51509148), Shandong Provincial Natural Science Foundation of China (BS2015NJ010), China Postdoctoral Science Foundation (2015M572066) and Ph.D. Programs Foundation of Ministry of Education of China (20133718110003).

第一作者简介: 张伟杰, 男, 1984 年生, 博士, 讲师, 主要从事地下工程水害预测预报及治理方面的教学与研究工作。E-mail: sdzhangweijie@126.com

modes: shear splitting, in situ splitting and intrusion splitting. The test method of porous and small grouting rate can reduce the disturbance of surrounding rock, increase the amount of grouting and the degree of consolidation of soil, and improve the effect of grouting reinforcement.

Keywords: 3D grouting model test system; clay medium; single-hole grouting experiment; multi-hole grouting experiment; real-time monitoring

1 引言

模型试验可真实、全面、直观地反映岩土体在外力扰动下的力学行为及变形特征,在解决地下工程结构力学与施工力学课题的研究中具有天然优势^[1-3]。在注浆领域,模型试验方法受到相关学者愈来愈多的关注,成为注浆理论研究的重要途径。由于涉及到被注介质、地质环境、注浆材料及注浆工艺等多方面^[4-8],浆液在被注岩体内部扩散路径复杂,加固空间分异特征显著,注浆加固过程中岩体受力状况、变形趋势及稳定特征为解析方法和数值方法研究带来极大困难。因此,需要研制相关试验装置,开展模型试验研究。在此方面,多位学者已开展研究,张忠苗等^[9]基于室内模拟试验,分析了黏土注浆过程中压密起始浆泡及劈裂裂隙的自然产生与发展;杨坪等^[10]通过在模拟的砂卵(砾)石层中进行注浆试验,研究了注浆压力、浆液水灰比等因素对注浆后结石体抗压强度的影响规律;程盼等^[11]进行了冲积层中注浆加固试验,得出了浆液在冲积层中的劈裂机制及加固特性;葛家良等^[12]通过岩体注浆模拟试验,分析了注浆结石体强度特征和影响规律;刘长武等^[13]通过微观分析及宏观力学参数的对比研究,探索了注浆对结构面力学特征的影响机制;Evdokimov 等^[14]、Swedenborg 等^[15]研究了硬岩节理裂隙注浆前后力学特征;郭密文^[16]、

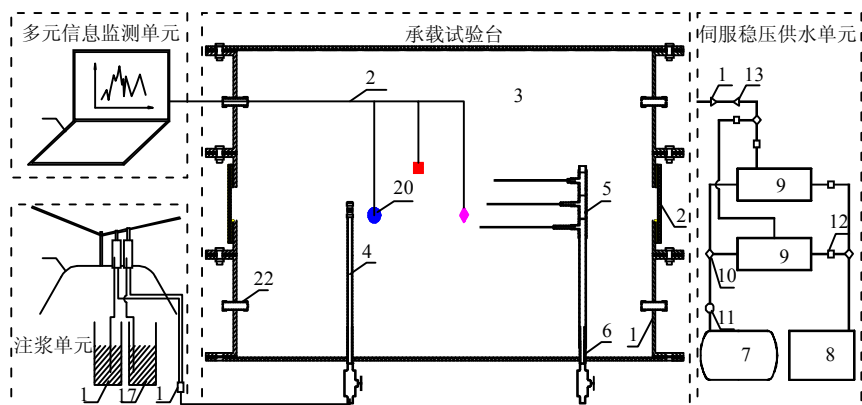
张改玲^[17]利用高压注浆试验装置研究了高压封闭条件下饱和孔隙介质中化学注浆扩散机制及微观机制。以上研究主要针对浆液在被注介质中宏观扩散规律和加固效果进行的,均未涉及到注浆过程中被注岩体的受力情况、变形趋势以及稳定性特征。

此外, Kleinlugtenbelt 等^[18]研制了三维注浆系统对砂体注浆机制开展研究,实现了被注介质的孔隙水压力和总应力实时监测,具一定先进性。但该试验系统存在以下不足:①注浆管设计为水平方向,不便开展多孔、分序注浆试验;②系统中各个单元由未分隔的圆环构成,不利于注浆加固岩体开挖及细部研究;③试验系统功能单一,不能开展隧洞开挖、帷幕注浆、加固圈稳定性评价等相关试验研究。

为克服以上研究的不足,实现不同介质中参数灵活可调的多孔注浆、多序次注浆模拟试验、被注岩体内部物理场信息实时采集、注浆加固效果评价(注浆加固体抗渗性能^[19])等功能,本文研制了三维注浆模型试验系统,该系统由承载试验台、伺服稳压供水单元、注浆单元、多元信息监测单元及图像采集单元组成,并运用该试验系统开展了研究工作,取得了较好的效果。

2 富水破碎带突涌水及注浆治理三维模型试验系统的研制

图1为三维注浆模型试验系统设计图。



注: 1—试验腔; 2—导洞盘; 3—被注岩体; 4—TAM 注浆管; 5—多孔分序注浆装置; 6—预留注浆孔; 7—空压机; 8—高压供水泵; 9—稳压储水腔; 10—三通; 11—稳压调节阀; 12—转换阀门; 13—流量计; 14—精密压力表; 15—注浆泵; 16—水泥浆; 17—控制液; 18—混合器; 19—数据采集仪; 20—传感器; 21—数据线; 22—引线孔

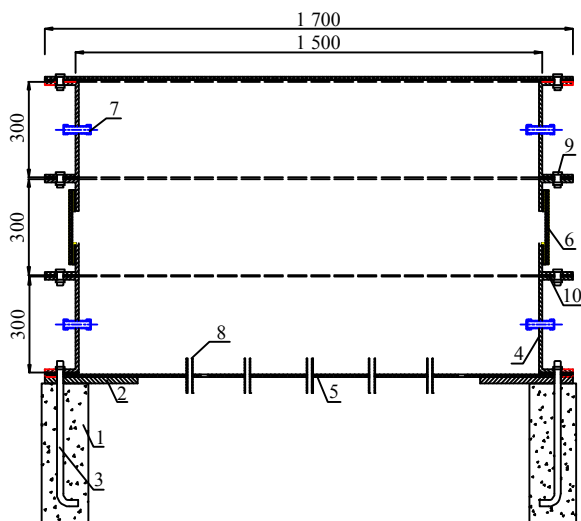
图1 三维注浆试验系统设计示意图

Fig.1 Design schematic of 3D grouting test system

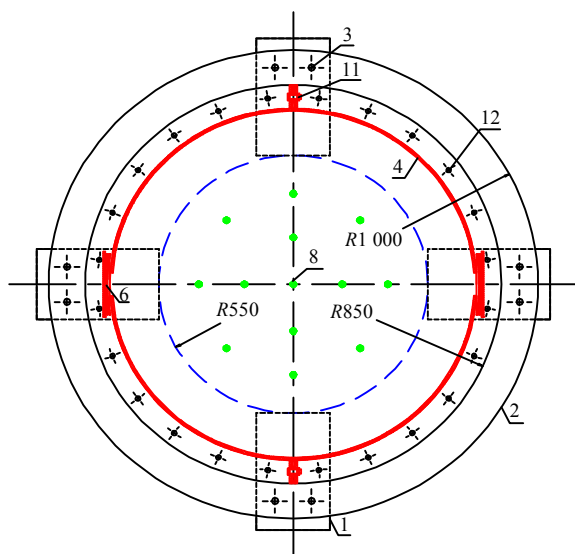
三维注浆模型试验系统由承载试验台、伺服稳压供水单元、注浆单元、多元信息监测单元及图像采集单元等 5 部分组成。

2.1 承载试验台

图 2 为承载试验台结构设计图。



(a) 侧视图



(b) 俯视图

注：1—支撑柱；2—承载板；3—预埋螺栓；4—试验腔；5—试验腔底板；6—导洞盘；7—引线孔；8—预留注浆孔；9—竖向螺栓；10—橡胶垫；11—横向螺栓；12—竖向固定孔

图 2 承载试验台结构设计图(单位: mm)

Fig.2 Structure design of bearing test bench(units: mm)

承载试验台包括承载台和试验腔两部分。承载台由 4 根钢筋混凝土支撑柱及承载板构成。支撑柱区域构成管路连接、注浆操作空间。承载板呈圆环状，通过预埋螺栓固定支撑柱，并通过竖向螺栓固

定试验腔。

试验腔采用组合式桶状设计，由 10 mm 厚的钢板制成，包括若干个 $\phi 1\ 500\ \text{mm} \times 300\ \text{mm}$ (直径×高) 环单元及底板。环单元由 2 个圆弧板经横向高强螺栓连接而成。若试验涉及到隧洞开挖 (如隧洞帷幕注浆模型试验^[19])，试验腔壁通过可拆卸螺栓连接圆形导洞盘，以控制洞口密封性及开挖方向。试验腔底板预留注浆孔 (如图 2 所示)。试验台所有机械连接部位均放置 10 mm 高强橡胶垫以保证密封性。

2.2 伺服稳压供水单元

针对富水条件下的注浆模型试验，利用伺服稳压供水单元不间断提供稳压地下水环境。该单元由空压机、调压稳压器、补给设备、控制输出装置及稳压储水腔构成 (如图 3 所示)。

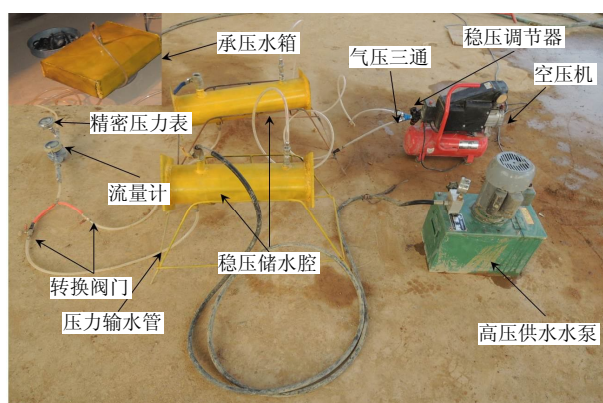


图 3 伺服稳压供水单元组装图

Fig.3 Assembly chart of servo water supply unit

空压机输出高压气体并经调压稳压器在 0~0.8 MPa 范围内调整压力，高压气体输入稳压储水腔使腔内水承压，并推动承压水注入到承压水箱内，供给隐伏构造或破碎岩体。为保障系统不间断供水，按照多腔气动联动控制方案设计 2 个稳压储水腔交替使用。

2.3 注浆单元

注浆单元由腔外分单元和腔内分单元构成，两部分经预留注浆孔连接。

腔外分单元包括注浆泵、搅拌设备及输送设备。注浆装备型号与性能如表 1 所示。

腔内分单元主要包括两类注浆装备，即 TAM 注浆管和多孔分序注浆装置。TAM 注浆管利用 4 个水平出浆口使浆液在平面内均匀扩散 (如图 4 所示)，避免了单一出口造成的浆液扩散不均现象；联

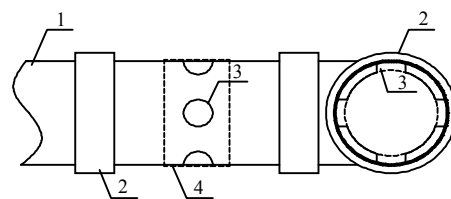
合数个 TAM 管即可实现多孔注浆模拟试验。

表 1 注浆装备型号与性能

Table 1 Types and performances of grouting equipments

装备类别	组成设备	性能
注浆泵	ZBSS0.1/10 双液注浆泵	注浆速率 0~25 L/min 内无级调节， 最大注浆压力为 10 MPa
搅拌装置	搅拌机 A、B 搅拌桶	50~400 转/min 无级调节 350 L
浆液输送装置	高压输浆管 混合器	耐受压力≤20 MPa 被动静态螺旋混合器

多孔分序注浆装置采用低刚度 PVC 材料和聚乙烯软管制作。3 个 PVC 三（四）通依次连接，之间安置薄铝片作为浆液阻隔片，实现分序注浆。此外，三（四）通与弯头、 $\phi 12$ mm PVC 管粘结，制

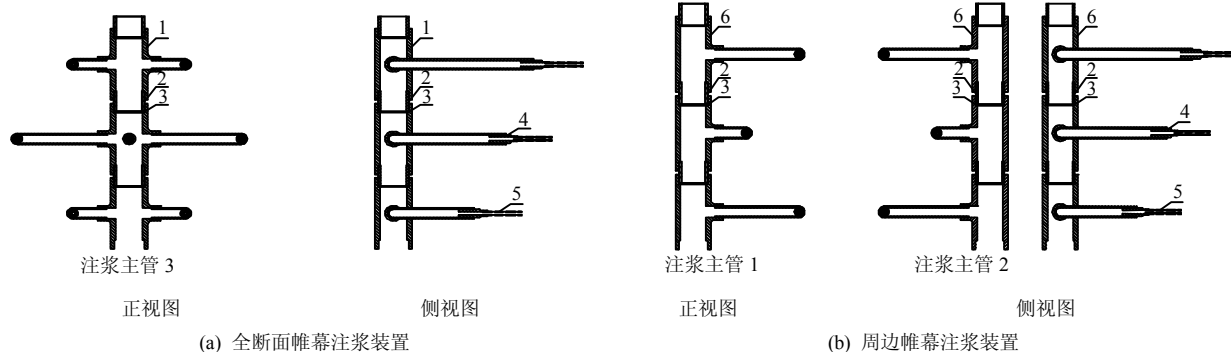


注：1—注浆管；2—阻隔环；3—出浆孔；4—逆止环

图 4 TAM 注浆管结构设计图

Fig.4 Structure design of TAM grouting pipe

成帷幕框架；框架末端连接 $\phi 6$ mm 聚乙烯软管作为帷幕注浆小管，其上钻设多组 $\phi 2$ mm 溢浆孔。利用这种注浆装置可实现帷幕注浆模拟试验，装置改进后亦可开展单孔多序注浆模拟试验。多孔分序注浆装置结构设计图如图 5 所示。



注：1—PVC 四通；2—PVC 连通管；3—阻隔片；4—快速接头；5—注浆软管；6—PVC 三通

图 5 多孔分序注浆装置结构设计图

Fig.5 Structure design of multiple drillings and sequenced grouting device

2.4 多元信息监测单元

基于 F-P 技术，建立了以全自动信息采集的光纤监测系统为核心的多元信息并行实时监测系统^[20]，全面捕捉试验中位移场、应力场、渗流场等多场信息的变化规律。

2.5 图像采集单元

该单元由高清摄像头、摄像机和数码相机构成，用于试验准备、试验过程及现象的图像采集。

图 6 是三维注浆试验系统实体图。本试验系统



图 6 注浆三维模型试验系统

Fig.6 3D grouting model test system

已申请国家发明专利。

3 应用实例

3.1 工况 A

利用本试验系统进行黏土单孔注浆加固试验。

(1) 试验方案

黏土选自江西省某隧道突泥体，填入试验腔之前，需经干燥、粉碎、筛选、添加拌合水、均匀搅拌等工序；采用分层法填筑，即试验腔内均匀摊铺黏土，然后逐层夯实，通过各层材料质量、压实厚度两指标控制材料均匀程度；将相邻传感器引线收拢合并，在引线孔中统一引出，最大程度上保障被注介质均匀性。试验黏土基本物理性质如表 2 所示。

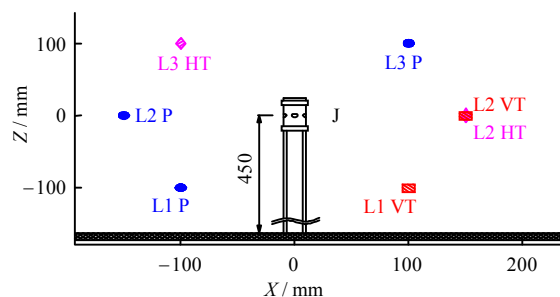
表 2 试验黏土基本物理性质

Table 2 Physical properties of soil

含水率/%	干密度 ρ_d /(g/cm ³)	液限 w_L /%	塑限 w_P /%
30	1.73	51.2	27.3

注浆试验采用定量双液注浆方式, 选择 P.O.32.5 复合硅酸盐水泥-水玻璃双液浆, 其中水泥浆中水与水泥质量比 (即水灰比) $W/C=1$, 水泥浆与水玻璃体积比 $C:S=1:1$ 。注浆试验主要参数如表 3 所示。

试验中, 将 1 根 TAM 注浆管(J)连接承载试验



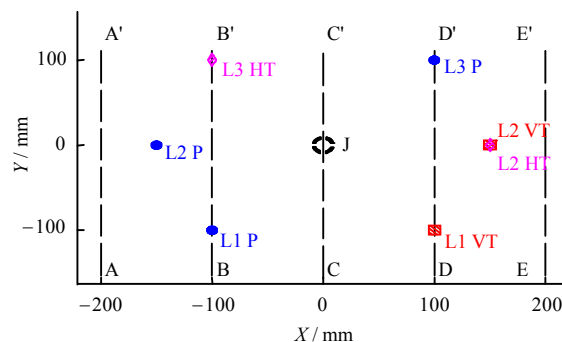
(a) 正视图

台底板中心预留孔 (见图 7); 出浆孔附近布置总压力传感器(T)和孔隙水压力传感器(P), 布置方式及编号如图 7 所示。

表 3 工况 A 注浆参数表

Table 3 Grouting parameters of working condition A

注浆孔	注浆速率 $q/(L/min)$	注浆量 Q/L	注浆终压 p_p/kPa
J	12	10	280



(b) 俯视图

注: HT—水平总压力传感器; VT—垂直总压力传感器; P—孔隙水压力传感器; J—TAM 注浆孔; A~E: 观测剖面

图 7 工况 A 传感器布置图

Fig.7 Layouts of sensors under working condition A

(2) 试验结果及分析

试验后自上而下揭露注浆后土体, 上部黏土密实度提高, 但未发生渗透注浆; 开挖发现, 凝固的浆液主要以浆脉形式存在; 出浆口附近发生压密注浆并产生小规模浆泡。因此, 注浆模式以劈裂注浆为主。在浆液扩散区布置 5 条观察剖面, 逐次切割揭露浆脉形态, 如图 8 所示。

分析图 8 可知, 浆液首先在出浆口处形成不规则的浆泡, 并在浆泡顶部突破生成圆锥形主干劈裂浆脉。越靠近注浆孔, 浆脉越厚, 最大处为 135 mm, 且厚度变异性大 (见图 8(c)、(d)), 远离注浆孔, 浆脉逐渐变薄, 最薄处为 0 mm, 且主干浆脉厚度逐渐均匀 (见图 8(a)、(e))。

图 9 为岩体内部总压力 T 、孔隙水压力 P 及注浆压力 p 随时间变化曲线图。

分析图 9 可得如下认识:

(1) $p-t$ 曲线总体呈上升趋势, 出现多个波峰-波谷旋回, 峰值分别为 51、187 及 280 kPa, 代表浆液在土体内发生数次劈裂。

(2) 注入浆液产生荷载 (注浆压力和浆液自重) 施加于被注岩体内部, 引起总压力和孔隙水压力变

化, 产生超孔隙水压力。总压力、孔隙水压力、注浆压力增大而激增, 在注浆结束点附近达到峰值。注浆停止时刻, 总压力及超孔隙水压力随之衰减, 并逐渐趋于稳定。

(3) 注浆结束后监测值经历迅速衰减和缓慢衰减两阶段, 快速衰减历时较短, 为 5~10 s, 但衰减量约占总衰减量的 75.5~82.2%; 缓慢衰减历时 45~87 s。这一现象表明, 注浆结束后岩体内部应力短时间内迅速调整为准稳定状态, 但达到最终稳定状态则需要更长时间。

(4) 受浆液扩散形态控制, 注浆对监测断面影响程度差别显著。L2 距离出浆口最近, 优先受到影响, 影响程度最大, 监测数据峰值为 174.8~274.2 kPa; 浆液向上圆锥形扩散, 对 L3 影响程度大于 L1, 监测数据峰值为 216.4~231 kPa。

(5) 注浆阶段有效应力显著提高, 并在注浆结束点附近达到峰值。L1、L2、L3 断面有效应力峰值分别为 43.4、72.4、14.6 kPa。注浆结束后随着总压力及孔隙水压力衰减, 各断面有效应力稳定在 1.2~2.3 kPa 之间。表明随着岩体内部应力状态调整, 注浆影响范围内注浆效果趋于均一化。

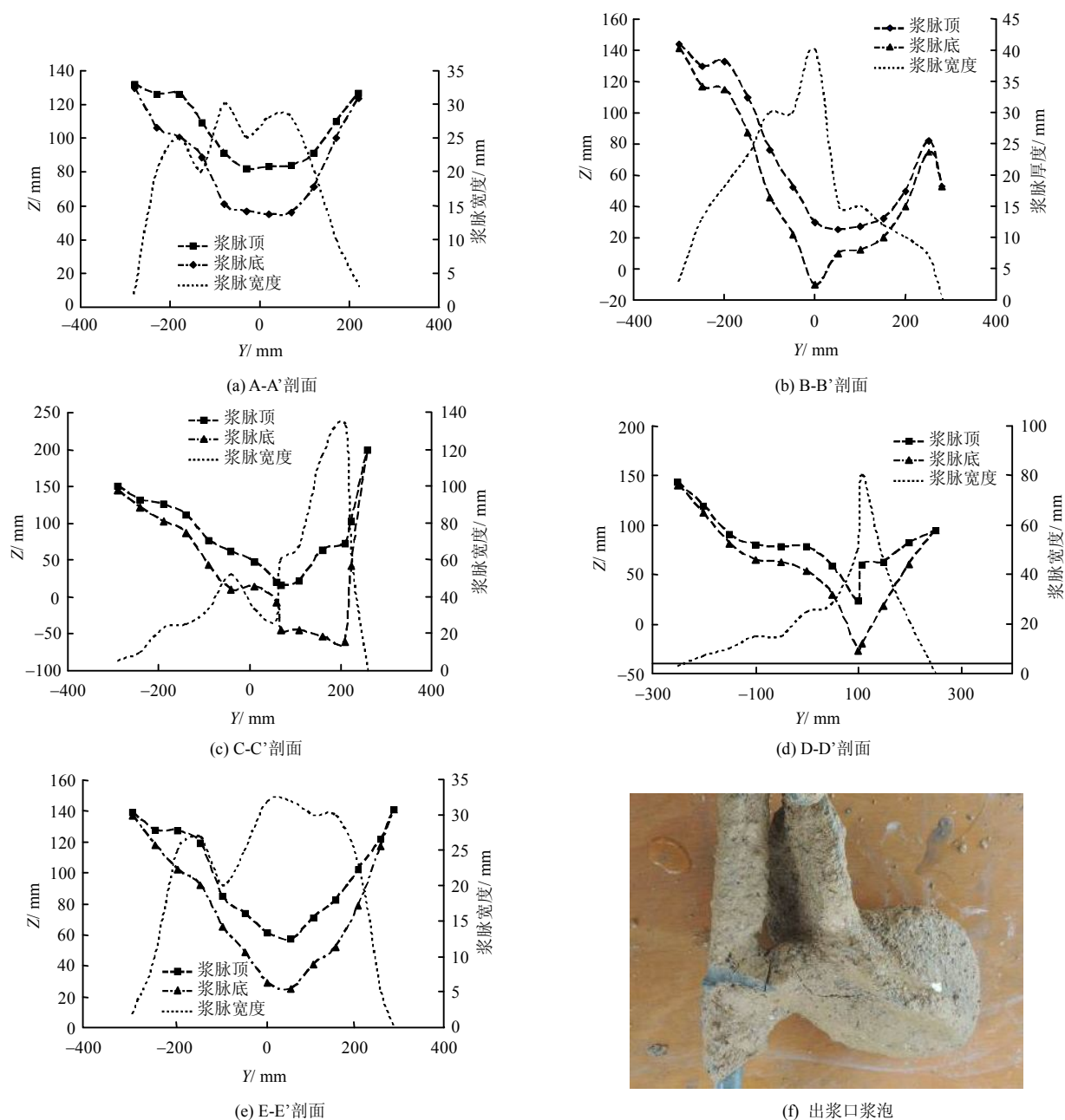


图8 工况A 劈裂浆脉形态

Fig.8 Shapes of slurry vein under working condition A

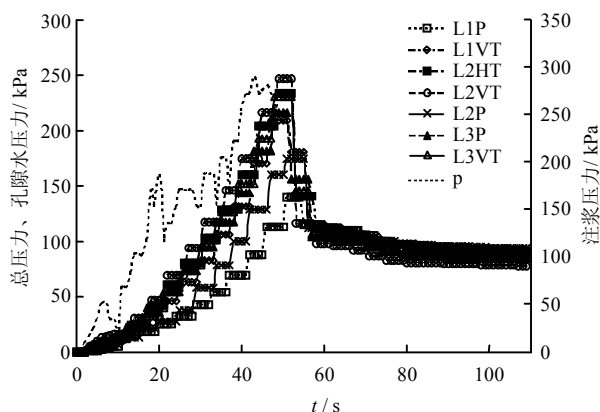


图9 工况A 总压力、孔隙水压力、注浆压力随时间变化曲线
Fig.9 Curves of total pressure, pore water pressure and grouting pressure changing along time under working condition A

3.2 工况B

利用本试验系统进行黏土多孔注浆加固试验。

(1) 试验方案

设计3次注浆试验,依次利用J1、J2、J3 3个TAM注浆管进行,注浆管布置如图10所示。J1出浆孔上部布置监测断面L2, J1、J3出浆孔之间布置监测断面L1,传感器布置方式及编号如图10所示。

黏土介质填筑及注意事项见工况A,试验黏土基本物理性质如表2所示。注浆试验采用定量双液注浆方式,选择P.O.32.5复合硅酸盐水泥-水玻璃双液浆,其中 $W/C=1$, $C:S=1:1$,注浆试验主要参数如表4所示。为区分各序注浆凝胶体,便于观察和

研究,在各序浆液中添加氧化铁类颜料,使之呈现不同颜色(如表4所示)。

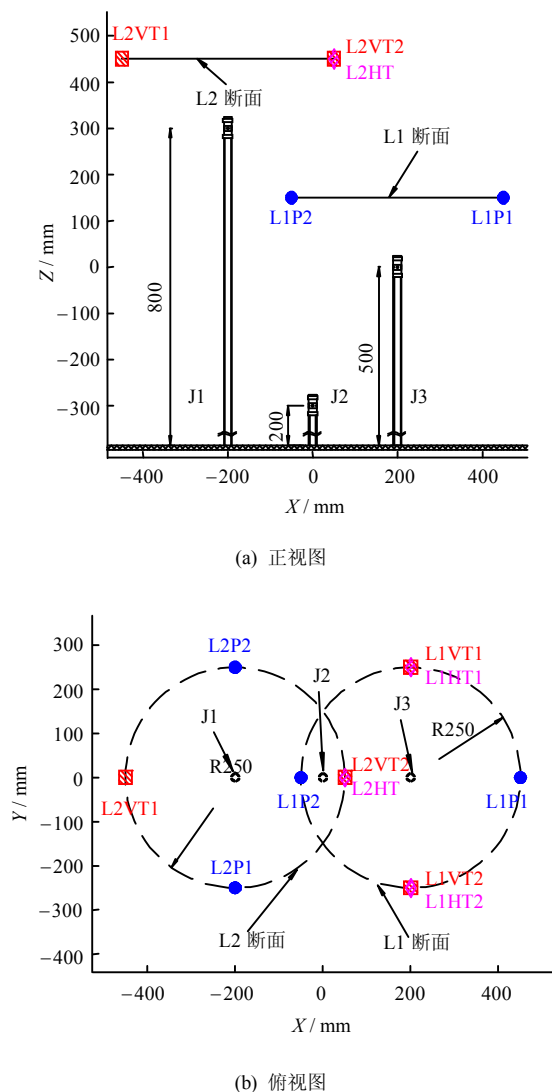


图10 工况B传感器布置图

Fig.10 Layouts of sensors under working condition B

表4 工况B注浆参数表

Table 4 Grouting parameters of working condition B

注浆 次序	注浆孔	注浆速率 $q / (\text{L} \cdot \text{min}^{-1})$	注浆量 Q / L	注浆终压 p_p / kPa	添加颜料
1	J1	2.67	35.0	146	氧化铁红
2	J2	2.74	27.5	170	氧化铁蓝
3	J3	2.71	35.0	195	氧化铁黄

(2) 试验结果及分析

图11为试验加固体开挖揭露照片。

由图可知,三序浆脉呈现显著差别的红、蓝、黄色,注浆加固模式主要以劈裂注浆为主,并形成3条主干浆脉和数条分枝浆脉。主干浆脉之间相互穿插,构成多种劈裂接触关系(如图12所示)。

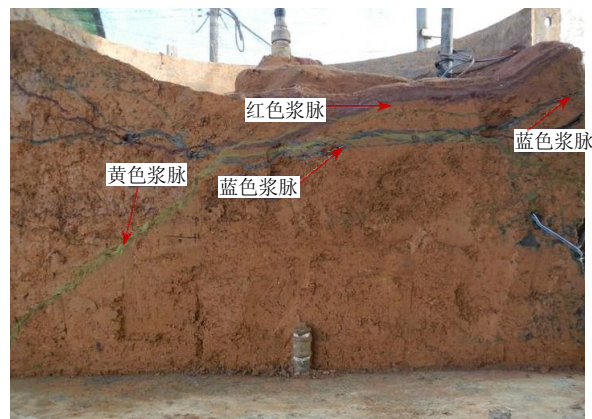


图11 开挖揭露的注浆加固体

Fig.11 Excavating reinforced grouting body

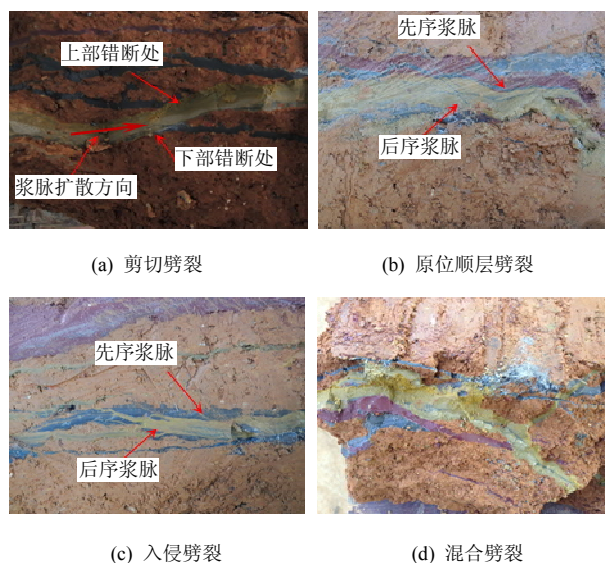


图12 浆脉之间的劈裂接触关系

Fig.12 Fracturing relationships of slurry veins

①剪切劈裂:后序浆脉横切前序浆脉,在破断点附近引起一定的位置错动,该情况下两条浆脉夹角为 $20^\circ \sim 45^\circ$ 。根据错动关系可判断后续浆脉扩散方向,即前序浆脉在破断位置之上、下部分相对移动方向指示后续浆脉扩散方向。

这种接触关系表征岩体剪切破坏,形态上表现为浆脉的延伸,易产生圆锥形浆脉,如图11中黄色浆脉和红色浆脉。

②原位顺层劈裂:后续次浆液沿前期浆脉劈裂缝继续拓宽,两种浆脉平行分布。这种现象是由于局部存在优势通道(分层填筑造成),先期注浆量偏少,未完全充填通道,后续注浆趋向优势通道扩散;或者是前期注浆压力较小,浆脉和围岩之间未充分粘结,存在缝隙,成为后序浆脉扩散通道;原位顺层劈裂往往过渡为剪切劈裂。

这种接触关系表征岩体的拉张破坏,在形态上表现为浆脉宽度的增大。

③ 入侵劈裂: 后续浆液将前序浆脉劈开,在其内部楔形扩展。这种现象是由于前期浆液未充分固化,自身成为软弱区所致。

以上3种劈裂接触关系多是同时出现的,呈现复杂的混合劈裂形式。

图13为岩体内部总压力、孔隙水压力及注浆压力随时间变化曲线图。

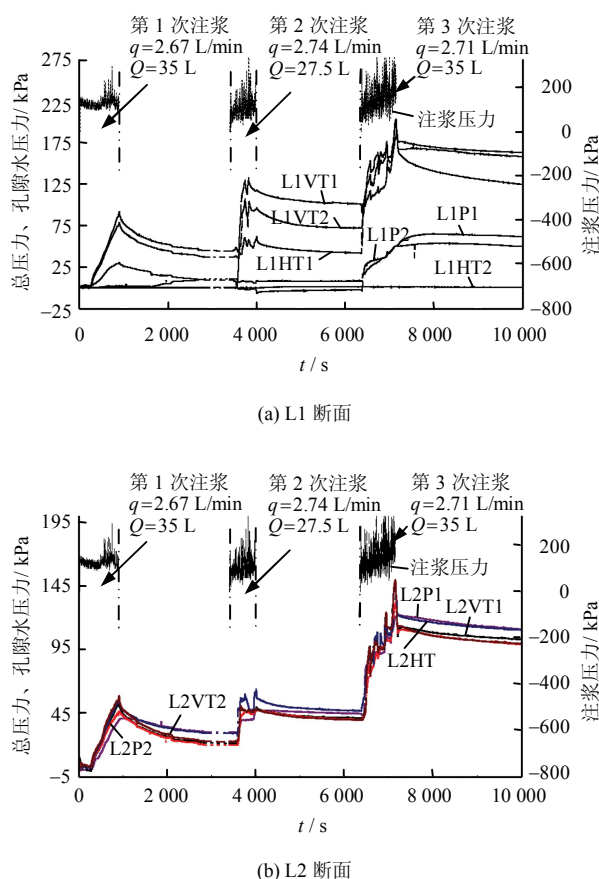


图13 工况B两断面总压力、孔隙水压力、注浆压力随时间变化曲线

Fig.13 Curves of total pressure, pore water pressure and grouting pressure of sections L1, L2 changing along time under working condition B

分析图13可得如下认识:

(1) 与单孔注浆类似,多孔注浆过程中 $p-t$ 曲线震荡强烈,出现多个波峰-波谷旋回,表明每次注浆均发生数次劈裂作用,推动浆脉在岩体内扩散。

(2) 总压力及孔隙水压力值随注浆压力增大而激增,在结束时刻附近达到峰值,随后进入衰减阶段。每次注浆引起的衰减稳定值大于初始值,且随着注浆次数的增加,该现象愈加显著。如3序次试验中,注浆终压变化不大(146~195 kPa),相比1

序注浆,2序注浆总压力衰减稳定值提高0.59~1.66倍,平均增大107.68%;孔隙水压力衰减稳定值提高0.04~1.12倍,平均增大55.4%。相比2序注浆,3序注浆总压力衰减稳定值提高0.53~1.72倍,平均增大124.30%;孔隙水压力衰减稳定值提高1.24~6.07倍,平均增大255.57%。

(3) 3序次试验过程中,有效应力衰减稳定值总体呈增大趋势,以L2监测断面为例,该值分别为9.4、4.2及11.3 kPa。表明相比单孔注浆,多次注浆显著提高了土体有效应力,黏土逐渐压缩固结,力学性质提高。

对比工况A和工况B中1序注浆试验,采用较小注浆速率,可降低注浆终压(由280 kPa降至146 kPa)以减小围岩扰动(总压力峰值由274.2 kPa降至57.5~86.3 kPa);提升注浆量(由10 L增至35 L)以增大土体内浆液充填率、增强土体压缩固结程度,最终获得较高的有效应力(有效应力由1.2~2.3 kPa增至9.4 kPa);增大浆液扩散距离(如图8及图11所示)以扩展注浆影响范围。若结合多孔注浆方式,这一优势更为明显。因此,在工程实践中,注浆加固宜采用较小的注浆速率,并结合多个钻孔注浆,提高注浆总量,能达到较理想的注浆效果。

限于文章篇幅,帷幕注浆模型试验部分另文介绍。

4 结 论

(1) 研制了三维注浆模型试验系统,由承载试验台、伺服稳压供水单元、注浆单元、多元信息监测单元及图像采集单元组成。系统具有密封性好、拆卸方便、可并行采集被注浆体内不同空间位置物理场信息等优点。

(2) 利用该试验系统开展了黏土介质单孔注浆和多孔注浆模型试验,获得注浆压力变化特征及岩体内部物理场时空演化规律: $p-t$ 曲线出现多个波峰-波谷旋回,表征劈裂注浆为主的加固模式;总压力、孔隙水压力、有效应力与注浆压力基本同步变化,注浆结束点达到峰值,其后开始衰减并逐渐趋于稳定;多孔注浆显著提高黏土有效应力,改善土体力学性能。

(3) 不同序次浆脉之间存在复杂的接触关系,划分为剪切劈裂、原位顺层劈裂及入侵劈裂3种基本模式。剪切劈裂与原位顺层劈裂分别表征岩体的剪切破坏和拉张破坏;入侵劈裂表征未完全固结浆

液作为软弱带存在。

(4) 黏土介质注浆中, 运用较小注浆速率结合多孔注浆试验方法, 可有效减小围岩扰动, 提高浆液充填率及土体压缩固结程度, 显著增大土体有效应力。因此, 注浆加固工程中, 宜采用小注浆速率, 并在加固范围内合理布设多个注浆孔, 可取得较好的注浆效果。

参 考 文 献

- [1] 李利平, 李术才, 赵勇, 等. 超大断面隧道软弱破碎围岩渐进破坏过程三维地质力学模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(3): 550—560.
LI Li-ping, LI Shu-cai, ZHAO Yong, et al. 3D geomechanical model for progressive failure progress of weak broken surrounding rock in super large section tunnel[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2012, 31(3): 550—560.
- [2] 张强勇, 李术才, 李勇, 等. 大型分岔隧道围岩稳定与支护三维地质力学模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增刊 2): 4051—4059.
ZHANG Qiang-yong, LI Shu-cai, LI Yong, et al. 3D geomechanical model test research on stability and supporting for surrounding rock mass of a large-scale diversion tunnel[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26 (Supp.2): 4051—4059.
- [3] 李术才, 李利平, 李树忱, 等. 地下工程突涌水物理模拟试验系统的研制及应用[J]. 采矿与安全工程学报, 2010, 27(3): 299—304.
LI Shu-cai, LI Li-ping, LI Shen-chen, et al. Development and application of similar physical model test system for water inrush of underground engineering[J]. **Journal of Mining & Safety Engineering**, 2010, 27(3): 299—304.
- [4] 翁敦理, 陈明辉. 深孔注浆技术在地铁暗挖隧道施工中的应用[J]. 现代隧道技术, 2012, 49(2): 137—141.
WENG Dun-li, CHEN Ming-hui. Application of deep-hole grouting in the construction of bored metro tunnels[J]. **Modern Tunnelling Technology**, 2012, 49(2): 137—141.
- [5] 张庆松, 韩伟伟, 李术才, 等. 灰岩角砾岩破碎带涌水综合注浆治理[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31: 2412—2419.
ZHANG Qing-song, HAN Wei-wei, LI Shu-cai, et al. Comprehensive grouting treatment for water gushing analysis in limestone breccias fracture zone[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2012, 31: 2412—2419.
- [6] 邹金峰, 徐望国, 罗强, 等. 饱和土中劈裂灌浆压力研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(7): 1082—1086.
ZOU Jin-feng, XU Wang-guo, LUO Qiang, et al. Study on grouting pressure of fracture grouting in saturated soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(7): 1082—1086.
- [7] 丁建文, 刘铁平, 曹玉鹏, 等. 高含水率疏浚淤泥固化土的抗压试验与强度预测[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(增刊 2): 55—60.
DING Jian-Wen, LIU Tie-ping, CAO Yu-peng, et al. Unconfined compression tests and strength prediction method for solidified soils of dredged clays with high water content[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2013, 35(Supp.2): 55—60.
- [8] 李术才, 张伟杰, 张庆松, 等. 富水断裂带优势劈裂注浆机制及注浆控制方法研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(3): 744—752.
LI Shu-cai, ZHANG Wei-jie, ZHANG Qing-song, et al. Research on advantage-fracture grouting mechanism and controlled grouting method in water-rich fault zone[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(3): 744—752.
- [9] 张忠苗, 邹健, 贺静漪, 等. 黏土中压密注浆及劈裂注浆室内模拟试验分析[J]. 岩土工程学报, 2009(12): 1818—1824.
ZHANG Zhong-miao, ZOU Jian, HE Jing-yi, et al. Laboratory tests on compaction grouting and fracture grouting of clay[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2009(12): 1818—1824.
- [10] 杨坪, 唐益群, 彭振斌, 等. 砂卵(砾)石层中注浆模拟试验研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 28(12): 2134—2138.
YANG Ping, TANG Yi-qun, PENG Zhen-bin, et al. Study on grouting simulating experiment in sandy gravels[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2007, 28(12): 2134—2138.
- [11] 程盼, 邹金峰, 李亮, 等. 冲积层中劈裂注浆现场模型试验[J]. 地球科学—中国地质大学学报, 2013, 38(3): 649—654.
CHENG Pan, ZOU Jin-feng, LI Liang, et al. Experiment of fracture grouting in alluvium with physical model[J]. **Earth Science-Journal of China University of Geosciences**, 2013, 38(3): 649—654.
- [12] 葛家良, 陆士良. 注浆模拟试验及其应用的研究[J]. 岩土工程学报, 1997, 19(3): 31—36.
GE Jia-liang, LU Shi-liang. Study on grouting simulation

- experiment and its application[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1997, 19(3): 31—36.
- [13] 刘长武, 陆士良. 水泥注浆加固对工程岩体的作用与影响[J]. 中国矿业大学学报, 2000, 29(5): 454—458.
LIU Chang-wu, LU Shi-liang. Reinforcement effect of cement grouting on engineering rock mass[J]. **Journal of China University of Mining and Technology**, 2000, 29(5): 454—458.
- [14] EVDOKIMOV P D, ADAMOVICH A N, FRADKIN L P, et al. Shear strengths of fissures in ledge rock before and after grouting[J]. **Hydrotechnical Construction**, 1970, 4(3): 229—233.
- [15] SWEDENBORG S, DAHLSTRÖM L O. Rock mechanics effects of cement grouting in hard rock masses[C]//Proceedings of the 2003 Specialty Conference on Grouting at the Third International Conference on Grouting and Ground Treatment. New Orleans: [s. n.], 2003, GSP120: 1089—1102
- [16] 郭密文. 高压封闭环境孔隙介质中化学浆液扩散机制试验研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2010.
GUO Mi-wen. Experimental investigation of propagation mechanism of chemical grout injection into porous media under a high pressure and closed environment[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2010.
- [17] 张改玲. 化学注浆固砂体高压渗透性及其微观机制[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2011.
ZHANG Gai-ling. High pressure permeability and micro-mechanism of chemically grouted sands[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2011.
- [18] KLEINLUGTENBELT R. Compensation grouting, laboratory experiments in sand[D]. [S. l.]: Delft Un. of Technology, 2005.
- [19] 张伟杰. 隧道工程富水断层破碎带注浆加固机制及应用研究[D]. 济南: 山东大学, 2014.
ZHANG Wei-jie. Mechanism of grouting reinforcement of water-rich fault fractured zone and its application in tunnel engineering[D]. Jinan: Shandong University, 2014.
- [20] 刘钦. 炭质页岩隧道软弱破碎围岩大变形机制与控制对策及其应用研究[D]. 济南: 山东大学, 2011.
LIU Qin. Study on large deformation mechanism and control measures of soft fractured rock and its application for carbonaceous shale tunnel[D]. Jinan: Shandong University, 2011.

上接第 901 页

- [11] 谢桂华, 张家生, 刘荣桂. 沉降计算经验系数的 Bootstrap 法置信区间估计[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2011, 42(9): 2843—2847.
XIE Gui-hua, ZHANG Jia-sheng, LIU Rong-gui. Estimation of confidence interval of empirical coefficients in calculating foundation settlement by Bootstrap method[J]. **Journal of Central South University (Science and Technology)**, 2011, 42(9): 2843—2847.
- [12] 陈立宏, 陈祖煜, 刘金梅. 土体抗剪强度指标的概率分布类型研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(1): 37—40.
CHEN Li-hong, CHEN Zu-yu, LIU Jin-mei. Probability distribution of soil strength[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(1): 37—40.
- [13] 苏永华, 何满潮, 孙晓明. 大子样岩土随机参数统计方法[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(1): 117—119.
SU Yong-hua, HE Man-chao, SUN Xiao-ming. Approach on asymptotic approximations of polynomials for probability density function of geotechnics random parameters[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2001, 23(1): 117—119.
- [14] 严春风, 刘东燕, 张建辉, 等. 岩土工程可靠度关于强度参数分布函数概型的敏感度分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(1): 36—39.
YAN Chun-feng, LIU Dong-yan, ZHANG Jian-hui, et al. The susceptibility analysis of reliability for the probability distribution types of parameters in strength criterion[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1999, 18(1): 36—39.
- [15] GRIFFITHS D V, HUANG J S, FENTON G A. Probabilistic infinite slope analysis[J]. **Computers and Geotechnics**, 2011, 38(4): 577—584.
- [16] RAHARDJO H, SATYANAGA A, LEONG E C, et al. Variability of residual soil properties[J]. **Engineering Geology**, 2012, 141—142: 124—140.

《岩土力学》2015 年第 10 期被 EI 收录论文 (38 篇, 收录率 100 %)

序号	论文题名	作者	页码
1	深埋硬岩隧洞围岩板裂化破坏研究的关键问题及研究进展	周 辉, 卢景景, 徐荣超, 等	2737—2749
2	海上风机分段斜壁桶形基础的水平承载力计算方法	刘金龙, 陈陆望, 王吉利, 等	2750—2758
3	一维对流-扩散试验各种边界条件及其统一形式解析解	张文杰, 赵 培, 贾文强	2759—2764
4	应力比与含水状态对松散堆积体动力参数及地表反应谱的影响	孙志亮, 孔令伟, 郭爱国, 等	2765—2772
5	微生物沉积碳酸钙固化珊瑚砂的试验研究	方祥位, 申春妮, 楚 剑, 等	2773—2779
6	复合桩基重复加卸载过程中侧向约束桩变位规律试验研究	周德泉, 颜 超, 罗卫华	2780—2786
7	边坡稳定分析条块力-位移法及其应用	卢应发, 黄学斌, 刘德富	2787—2798
8	考虑泊松效应影响的弹塑性荷载传递模型	苏 栋, 赵 鹏, 高 翔, 等	2799—2803
9	基于宏观损伤耦合的非贯通裂隙岩体本构模型	袁小清, 刘红岩, 刘京平	2804—2814
10	干湿循环作用下压实黏土力学特性与微观机制研究	万 勇, 薛 强, 吴 彦, 等	2815—2824
11	寒区级配碎石冻胀正交试验研究	王青志, 刘建坤, 田亚护, 等	2825—2830
12	NaCl 溶液对土体持水特性影响的试验研究	马田田, 韦昌富, 陈 盼, 等	2831—2836
13	考虑轴向力和渗透力时圆形隧道广义 Hoek-Brown 解	许 渊, 李 亮, 邹金锋, 等	2837—2846
14	三层堤基中细砂层厚度对管涌影响的试验研究	王 霜, 陈建生, 周 鹏	2847—2854
15	NaCl 侵蚀环境下水泥固化铬污染土的强度及淋滤特性	刘晶晶, 查甫生, 郝爱玲, 等	2855—2861
16	锌污染土物理与电学特性试验研究	储 亚, 刘松玉, 蔡国军, 等	2862—2868
17	考虑分层特性的尾砂胶结充填体强度折减试验研究	曹 帅, 宋卫东, 薛改利, 等	2869—2876
18	淋滤条件下 GGBS-MgO 固化铅污染黏土强度与溶出特性研究	薄煜琳, 于博伟, 杜延军, 等	2877—2891
19	膨胀土损伤变量不同表征方法评价的试验研究	程明书, 汪时机, 张雅倩, 等	2892—2898
20	水泥固化锌污染土电阻率与强度特性研究	张少华, 李 熠, 寇晓辉, 等	2899—2906
21	分级循环荷载下岩石动力学行为试验研究	何明明, 李 宁, 陈蕴生, 等	2907—2913
22	一种填方路堤反压护道断面设计的解析方法研究	赵宁雨, 梁 波, 黄 锋, 等	2914—2920
23	基坑挡墙变位诱发地表沉陷的模型试验研究	张戎泽, 钱建国	2921—2926
24	湿陷性黄土中成孔方式对桩基承载力影响试验研究	王端端, 周志军, 吕彦达, 等	2927—2933
25	被动桩水平位移荷载施加位置的探讨	上官士青, 杨 敏, 李卫超	2934—2938
26	局部冲刷下群桩水平承载试验研究	何泓男, 戴国亮, 杨炎华, 等	2939—2945
27	砂土中考虑冲刷的水平受荷桩等效应变楔方法	杨晓峰, 张陈蓉, 袁聚云	2946—2950
28	均质非饱和土一维稳态流头垂直分布的解析解	程大伟, 陈 茜, 安 鹏, 等	2951—2954
29	区间非概率可靠性方法在岩溶区稳定性分析中的适用性研究	曹文贵, 翟友成, 王江营	2955—2962
30	中俄原油管道漠大线运营后面临一些冻害问题及防治措施建议	李国玉, 马 巍, 王学力, 等	2963—2973
31	煤与瓦斯突出能量条件及突出强度影响因素分析	王 刚, 武猛猛, 程卫民, 等	2974—2982
32	刍议相关规范中关于单桩承载力计算的几点疑惑	付文光	2983—2988
33	砂土中刚性短桩的 p - y 模型案例研究	李卫超, 杨 敏, 朱碧堂	2989—2995
34	基于颗粒抗转动模型的刚性挡墙被动土压力临界状态离散元分析	蒋明镜, 贺 洁	2996—3006
35	基于流网单元的污染物优势运移数值模型	梁 越, 王俊杰, 刘明维	3007—3014
36	基于改进西原模型的深井冻结压力数值计算分析	马茂艳, 程 桦, 荣传新	3015—3022
37	基于黄土变形时效试验的高填方工后沉降研究	朱才辉, 李 宁	3023—3031
38	基于恒阻大变形锚索的滑坡监测预警系统研发及应用	陶志刚, 李海鹏, 孙光林, 等	3032—3040