

DOI: 10.11779/CJGE201904009

砂层劈裂-压密注浆模拟试验系统研发及试验

张连震^{1,2}, 李志鹏^{2,3}, 刘人太², 张庆松², 李术才²

(1. 中国石油大学(华东)储运与建筑工程学院, 山东 青岛 266580; 2. 山东大学岩土与结构工程研究中心, 山东 济南 250061;
3. 山东交通学院交通土建工程学院, 山东 济南 250357)

摘要: 劈裂-压密模式是砂层注浆扩散过程的主要模式之一。为研究砂层劈裂-压密注浆扩散过程, 研发了一套可视化注浆模拟试验系统, 该系统由模拟试验架、地应力加载模块、动态监测模块以及注浆控制模块 4 部分构成, 可实现劈裂-压密注浆扩散过程的可视化模拟。以青岛地区含黏性土砂层为典型被注介质, 开展了砂层劈裂-压密注浆模拟试验, 揭示了注浆扩散过程中劈裂通道形态、注浆压力、应力场以及位移场随时间变化规律, 获得了试验条件下的砂层劈裂-压密注浆影响范围。研究表明: 砂层注浆起裂方向与劈裂通道扩展方向均与大主应力方向一致, 浆脉厚度在浆脉扩展方向上存在明显衰减; 注浆会引起与劈裂通道垂直方向的应力增加, 且该应力沿劈裂通道扩展方向衰减, 但注浆对平行劈裂通道扩展方向的应力没有显著影响; 劈裂-压密注浆对劈裂通道两侧砂层的影响范围非常有限(20~40 cm)。最后从单孔注浆量、钻孔布置方面对砂层劈裂-压密注浆设计方法提出了改进建议。

关键词: 岩土力学; 砂层注浆; 劈裂-压密模式; 模拟试验; 扩散规律

中图分类号: TU452

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2019)04-0665-10

作者简介: 张连震(1990-), 男, 博士, 讲师, 主要从事地下工程灾害防治理论与应用方面的研究工作。E-mail: zhanglianzen@upc.edu.cn.

Simulation tests on fracture-compaction grouting process in sand layer

ZHANG Lian-zhen^{1,2}, LI Zhi-peng^{2,3}, LIU Ren-tai², ZHANG Qing-song², LI Shu-cai²

(1. College of Pipeline and Civil Engineering, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China; 2. Research Center of Geotechnical and Structural Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China; 3. School of Transportation and Civil Engineering, Shandong Jiaotong University, Jinan 250357, China)

Abstract: The fracture-compaction mode is the main diffusion mode of grouting process in sand layer. In order to study the diffusion process of fracture-compaction grouting mode in sand layer, a visible grouting simulation test system composed of test frame, stress loading module, dynamic monitoring module and grouting module is designed and developed. As the typical grouted medium, the clayey sand in Qingdao is used in the fracture-compaction grouting simulation tests. The characteristics of the dynamic evolution of the stress and displacement fields of sand layer and the propagation of fracture channel are derived. The influence scope of fracture-compaction grouting in sand layer is obtained. The results show that the initiation and propagation of fracture channel direction are consistent with those of the major principal stress in sand layer. The width of grouting vein decreases remarkably along the propagation direction. Under the influences of grouting, the vertical stress increases from the minor principal stress and decays spatially along the propagation direction. However, the horizontal stress has no obvious changes in the grouting process. The influence scope of fracture-compaction grouting in sand layer is very limited (20~40 cm). Finally, improvement suggestions for fracture-compaction grouting in sand layer are put forward from two aspects (grouting amount of single hole and arrangement of injection hole).

Key words: rock and soil mechanics; grouting in sand layer; fracture-compaction mode; simulation test; diffusion law

0 引 言

城市地铁、建筑基坑等地下工程修建过程中经常揭露第四系富水砂层, 该地层具有含水丰富、胶接强度低、自稳能力差的显著特点, 在工程扰动及地下水作用下, 极易诱发塌方、涌水溃砂等工程灾害事故^[1-3]。

注浆^[4-5]是砂层加固的最常用方法, 通过注浆可有效提高砂层的整体力学性能及抗渗性能。大量工程实

基金项目: 国家自然科学基金项目(51779133); 山东省自然科学基金项目(ZR2018BEE035); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(18CX02003A)

收稿日期: 2018-01-22

践表明,对于中砂、细砂或高黏性土含量砂等地层,由于上述地层一般不满足渗透可注性条件^[6],浆液无法以渗透模式在砂层中扩散,劈裂-压密是上述砂层注浆扩散过程的主要模式^[7]。在劈裂-压密注浆扩散过程中,浆液在较高的注浆压力作用下强行劈开砂层形成劈裂通道,在劈裂通道扩展的过程中劈裂通道两侧的砂层被压密,最终浆液以劈裂浆脉的形式存在于砂层中,浆脉骨架与被压密砂层共同提高砂层整体的各项性能(图1)。



图1 砂层注浆现场照片(青岛地铁2号线啤一苗区间)

Fig. 1 Photo of grouting in sand layer (Qingdao metro line 2)

目前对于砂层注浆的试验研究大多集中在渗透注浆扩散模式,杨坪等^[8]开展了砂卵石层的水泥浆液渗透注浆试验,获得了不同条件下注浆扩散半径及注浆体抗压强度;钱自卫等^[9]应用自研渗透试验装置研究了弱胶结孔隙介质化学注浆浆液充填及减渗的基本规律;宁博等^[10]以砂卵石材料为被注介质,研究了动水与静水渗流条件下注浆扩散范围与注浆压力、水灰比、渗流速度的关系;李术才等^[11]、韩伟伟等^[12]、Yoon等^[13]通过理论、室内试验等手段研究了砂层渗透注浆中渗滤效应对注浆扩散过程的影响,验证了考虑渗滤效应的必要性。

在劈裂-压密注浆模式试验研究方面,李鹏等^[14]、张伟杰等^[15-16]研发了三维注浆模拟试验系统,以软弱断层泥为被注介质,研究了多次劈裂注浆过程中的浆液扩散规律,揭示了注浆过程中地层应力场的反应特征;张忠苗等^[17]开展了黏土层的压密及劈裂注浆模拟试验,分析了浆液水灰比、注浆压力、压滤效应对注浆扩散形状的影响。上述研究均是针对黏土层、断层泥等介质,但由于砂层与黏土层、断层泥等介质在物理力学性能方面具有显著的区别,目前对于劈裂-压密注浆过程的研究结论未必适用于砂层劈裂-压密注浆过程,所以亟需开展砂层劈裂-压密注浆方面的研究。

为解决上述问题,本文开展了砂层劈裂-压密注浆扩散规律的研究,研发了一套可视化注浆模拟试验系统,该系统可实现劈裂-压密注浆扩散过程的可视化模

拟,以青岛地区含黏性土砂层为典型注浆介质,进行了劈裂-压密注浆模拟试验,揭示了注浆扩散过程中应力场、位移场及劈裂通道扩展过程的动态演化规律,并获得了劈裂-压密注浆对劈裂通道两侧砂层的影响范围。

1 注浆模拟试验系统研发

1.1 试验目的

(1) 实现砂层劈裂-压密注浆过程中劈裂通道扩展过程的可视化模拟。

(2) 获得劈裂通道宽度空间分布、裂缝尖端形状等几何形态特征,判定注浆扩散过程中浆液扩散锋面处的状态。

(3) 获得劈裂通道扩展过程中注浆压力与砂层内部应力场、位移场的动态演化规律。

1.2 试验原理

砂层注浆模拟试验原理如图2所示。通过钢框架对被注介质提供反力支撑,模型架内部空间宽度为2 m,高度为1 m,前后深度0.18 m,由于前后尺寸只有0.18 m,该方向的变形被大幅度限制,模型内部介质的受力状态可认为符合平面应变条件,介质只能沿上下或左右发生位移变形,前后不发生变形。通过上部加载板与两侧加载板人为设定大小主应力环境,注浆管垂直贯通砂层,保证注浆过程中浆液以水平浆脉的形式进行扩散。试验架内设置一面透明有机玻璃(尺寸:2 m×1 m),从而实现注浆扩散过程的可视化。砂层内布置应力及位移传感器,在浆液扩散过程中监测砂层内部应力场、位移场变化情况。

1.3 模拟试验系统构成

砂层可视化注浆模拟试验系统主要由四部分组成,分别为模拟试验架、地应力加载模块、注浆控制模块、动态监测模块(图3)。

(1) 模拟试验架

模拟试验架是试验中砂土体承载、传感器布设及注浆扩散空间,试验架内部为长方体空间,宽度2 m,高度1 m,前后深度18 cm(图4)。试验架采用模块化钢架拼装而成,钢架接触位置采用高强螺栓连接,钢架设置钢肋板以提高结构刚度,钢肋板厚度2 cm,高度15 cm。透明有机玻璃板安装在正面钢架的卡槽内,实现浆液扩散过程的可视化,通过钢肋板支撑保证透明有机玻璃板的安全稳定。

(2) 地应力加载模块

地应力加载模块由液压站、液压油缸、液压管路及加载钢板构成(图5),该模块包含两套液压管路,其中一套液压管路连接顶面钢架的液压油缸,用于施

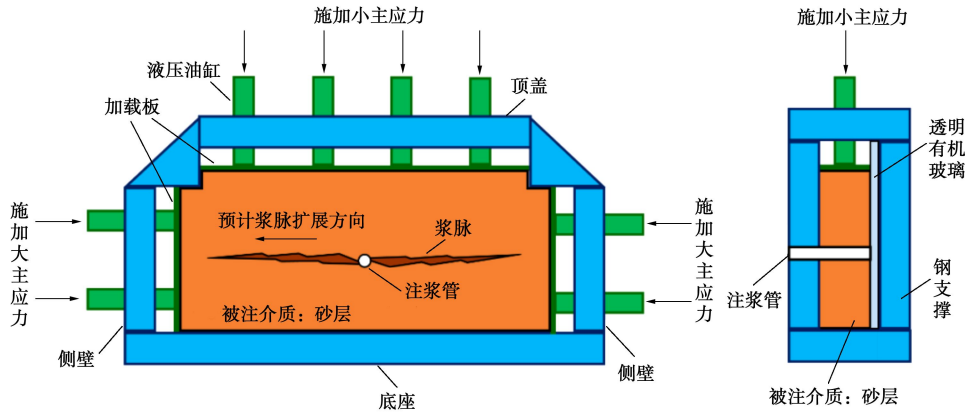


图 2 砂层注浆模拟试验系统原理

Fig. 2 Principle of sand slurry grouting simulation test system

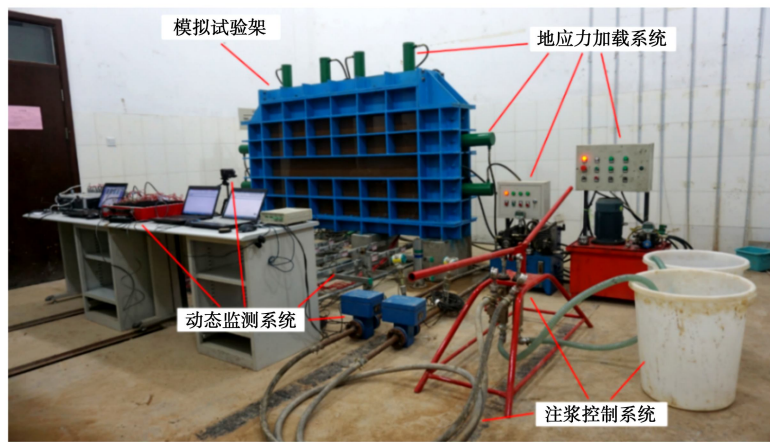


图 3 砂层注浆模拟试验系统照片

Fig. 3 Sand grouting simulation test system

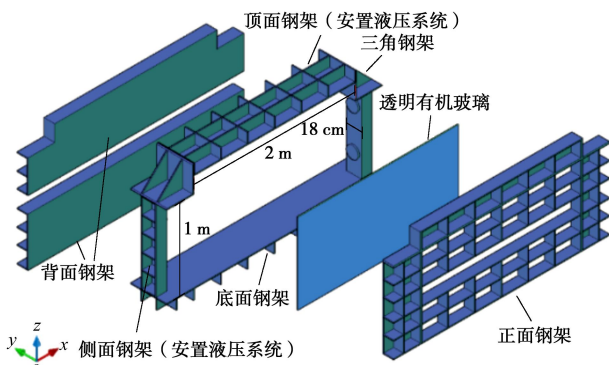


图 4 模拟试验架结构

Fig. 4 Structure of simulation test frame

加竖直方向的小主应力, 另一套液压管路连接侧面钢架的液压油缸, 用于施加水平方向的大主应力。固定于顶面钢架、侧面钢架的液压油缸连接加载钢板, 加载钢板位于试验架内部并与被注介质直接接触, 液压油缸的伸长运动带动加载钢板对被注介质施加垂直于加载钢板的应力。为了减轻模拟试验架内壁与砂层之间的摩擦力对试验地应力加载的影响, 在试验填料工作开展前, 在模拟试验架背面钢架内壁采用润滑油涂抹, 以最大限度的减小地应力加载过程中所产生的

摩擦力, 由于正面钢架透明有机玻璃本身为超平整结构, 所以其引起的摩擦力可以忽略。

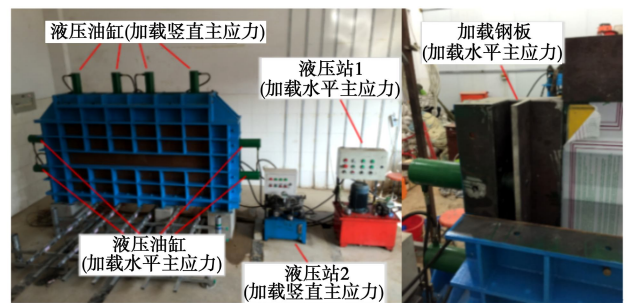


图 5 液压加载系统照片

Fig. 5 Hydraulic pressure system

地应力加载模块所能提供的地应力加载范围为 0~1.5 MPa, 适用于模拟城市地铁、浅埋隧道等工程所受地应力水平。当砂层填料完成后, 根据试验设计应力水平分别施加竖直方向与水平方向的地应力, 当砂层内部的应力传感器读数与目标地应力水平基本相等时, 表明地层应力状态已达到试验要求, 此时可实施注浆。在注浆实施过程中, 地应力应当持续施加并维持在固定水平不变。

(3) 动态监测模块

动态监测模块包括内部监测模块与外部监测模块。内部监测模块的作用是监测砂层内部的应力场与位移场；外部监测模块的作用是实时采集注浆过程中的注浆压力数据、注浆流量数据及浆液扩散形态图像。

a) 内部监测模块

应力场监测通过电阻应变式应力传感器、XL2101G静态应变仪及配套软件实现(图6),可监测浆脉附近及其他区域应力场变化状态。



图6 电阻式应力监测系统

Fig. 6 Resistance stress monitoring system

位移场监测采用光栅位移量测系统(图7),该系统由柔性微型多点位移计、高精度光栅位移传感器、数据采集箱与位移采集记录软件等部分构成。

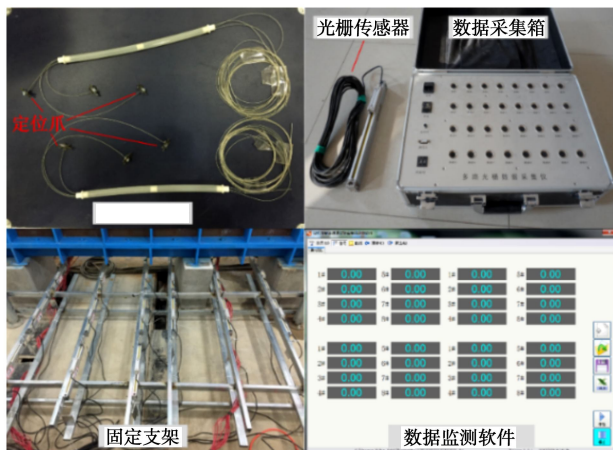


图7 光栅位移量测系统

Fig. 7 Grating displacement measurement system

b) 外部监测模块

通过在注浆管路上设置注浆记录仪(图8)动态监测注浆过程中的注浆压力及注浆流量。

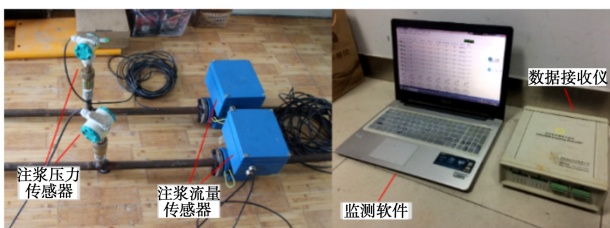


图8 注浆记录仪

Fig. 8 Grouting recorder

劈裂通道扩展形态随时间的变化情况反映了劈裂

通道尖端的受力状态及浆脉厚度的时空分布特征,在砂层注浆模拟试验中通过高清摄像机对浆液扩散形态进行实时采集,便于后续注浆动态扩散过程的分析。动态监测模块中各个传感器的性能指标如表1所示。

表1 传感器性能指标

Table 1 Performance indices of sensors

设备名称	量程	分辨率	准确度	测量原理	生产厂家
应力传感器	0~2 MPa	1 kPa	≤5 kPa	应变式	常州丰源土工程仪器有限公司
位移传感器	0~20 cm	1 μm	≤3 μm	光栅式	济南锡铠机械设备有限公司
注浆压力传感器	0~10 MPa	2 kPa	20 kPa	感应式	成都西江科技有限公司
注浆流量传感器	0~30 L/min	0.01 L/min	1%	感应式	成都西江科技有限公司

(4) 注浆控制模块

注浆控制模块由手动注浆泵、高压输浆管路、双液混合器、搅拌机及储浆桶构成(图9)。手动注浆泵既可以泵送单液浆,也可以泵送双液浆,泵送双液体积比为1:1。本试验注浆材料采用水泥-水玻璃双液浆,采用两套独立的注浆管路输送浆液,水泥浆液与水玻璃浆液通过双液混合器进行混合,混合后的浆液经由固定在背面钢架上的钢管接头进入试验架内部。注浆控制模块相关设备参数指标如表2所示。



图9 注浆控制模块

Fig. 9 Grouting control system

表2 注浆控制模块相关设备型号与性能

Table 2 Equipment performances of grouting system

设备名称	性能参数	生产厂家
ZBSS0.1/2.5 手动双液注浆泵	双液混合比: 1:1 输出压力: 0~2.5 MPa 注浆速率 0~10 L/min	山东交院机械厂
高速搅拌机	1100 转/min	联冠机械设备厂
高压输浆管	内径: 12.5 mm 最大耐受压力: 20 MPa	济南悦龙橡胶制品有限公司
双液混合器	混合形式: 四通孔外直接混合	济南悦龙橡胶制品有限公司

2 试验材料及试验方法

2.1 试验材料

(1) 被注介质

被注介质采用青岛地区含黏性土砂, 模拟试验中所用砂样取自青岛地铁 2 号线啤一苗区间第四系含黏性土砂层。该砂样为级配良好的含细粒土砂^[18], 砂层试样各项基本物理指标见表 3。该砂层试样中的黏性土成分为低液限黏土^[18], 其基本物理参数如表 4 所示。

表 3 砂层试样物理指标

Table 3 Physical indices of sand sample

含水率 /%	黏性土含量 /%	控制粒径 d_{60}/mm	有效粒径 d_{10}/mm	特征粒径 d_{30}/mm	不均匀系数 C_u	曲率系数 C_c
20.2	14.91	1.75	0.043	0.45	40.7	2.69

表 4 黏性土物理参数

Table 4 Physical parameters of cohesive soils

颗粒相对密度 G_s	液限 $w_L/\%$	塑限 $w_p/\%$	塑性指数 I_p	最优含水率 /%	最大干密度 $\rho_d/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$
2.72	32	14	18	15	1.798

(2) 注浆材料

选择砂层注浆中常用的水泥-水玻璃浆液 (C-S 浆液) 作为注浆材料, C-S 浆液是典型的速凝类浆液, 其凝胶时间在十几秒至十几分钟范围内可调, 具有速凝早强的特性, 可有效控制浆液扩散范围。C-S 浆液中水泥浆液水灰比 $W/C=1:1$, C-S 双液体积比 $C:S=1:1$ 。

试验用水泥为 42.5R 普通硅酸盐水泥, 水泥品质符合《硅酸盐水泥、普通硅酸盐水泥》(GB175—99) 标准。试验用水玻璃模数 M 为 3.0, 浓度 Be' 为 38。

2.2 试验方法

试验充填材料所用的砂为重塑砂, 填料过程中为控制各项物理指标与实际地层情况保持一致, 采用分层填筑法, 通过控制填料干密度来控制填料的密实程度, 试验中填料的初始干密度为 1.45 g/cm^3 , 在该密实程度下砂层试样所具有的力学参数如表 5 所示。

表 5 砂层试样力学参数

Table 5 Mechanical indices of sand sample

初始压缩模量 E_{s0}/MPa	特征应变变量 ε_2 (2 MPa 对应值)	初始孔隙比 e_0	初始渗透系数 $k_0/(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$
4.58	0.114	0.835	9.1×10^{-3}

在地铁工程中, 常规浅埋隧道的拱顶埋深普遍在 7~20 m, 本文试验参考以上埋深所对应的地应力水平, 模拟试验上部施加的小主应力大小为 50 kPa, 两侧施加的大主应力大小为 150 kPa。

注浆管采用铝塑管制作, 铝塑管长度为 18 cm, 与试验架内部空间深度相一致, 铝塑管端头封闭并在两侧打花管, 便于浆液从注浆管两侧进入被注介质。试验过程中控制注浆速率恒定, 注浆速率为 1 L/min。

2.3 监测点布置

由于模拟试验中地层受力状态为二维平面应变受力状态, 所以只在模型内部布设一个监测断面, 该监测断面平行于有机玻璃板并位于模型架中间, 该监测断面内应力传感器及位移传感器布置如图 10 所示。受模型顶部加载钢板的限制, 连接定位爪与光栅位移传感器的钢丝绳只能从底部钢架穿出, 所以模型下部区域主要布设位移传感器, 模型上部区域主要布设应力传感器。

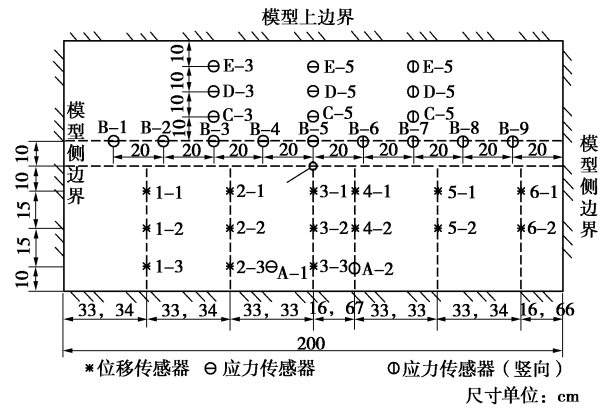


图 10 传感器布置

Fig. 10 Layout of sensors

应力场监测的主要目标是获得浆脉附近区域地应力随浆液扩散路径的变化情况以及地应力沿垂直浆脉方向的衰减情况, 竖向应力传感器与横向应力传感器基本上对称布置以监测水平与竖直地应力变化情况。在模型架底部分别布设了一个横向与竖向应力传感器, 通过该位置的地应力数据可确定地应力加载是否达到设计水平, 若地应力数据达不到设计要求, 则持续施加荷载直至达到目标地应力水平。受多点位移计原理的限制, 光栅位移传感器只能监测竖向位移。

3 浆液扩散形态分析

3.1 劈裂通道扩展过程

注浆过程中不同时刻劈裂通道形态如图 11 所示, 由于劈裂浆脉的厚度相比试验架尺寸较小, 且透明有机玻璃板存在反光现象, 导致劈裂通道形态照片的显示效果不是特别明显, 但是试验过程中通过肉眼可明确观察到劈裂通道形态的发展过程。T=30 s 时, 劈裂通道开始出现, 此时劈裂通道轴线基本上处于水平方向, 劈裂通道尖端距离注浆孔大约 30 cm, 随着注浆过程的进行, 劈裂缝尖端继续沿水平方向发展, 劈裂

通道开度也不断增大, $T=200\text{ s}$ 时, 劈裂通道尖端距注浆孔约 90 cm , 此时注浆结束, 在注浆全过程中劈裂通道基本上沿着水平方向扩展。试验中竖向地应力为小主应力 (50 kPa), 水平地应力为大主应力 (150 kPa), 砂层注浆起裂方向与劈裂通道扩展方向均与大主应力方向一致。



(a) $T=30\text{ s}$



(b) $T=200\text{ s}$ (注浆结束时)

图 11 劈裂通道形态

Fig. 11 Morphology of split channel

3.2 浆脉厚度空间分布

注浆结束 24 h 后对模型试验架进行拆模, 并开挖砂层注浆加固体, 测量浆脉不同位置的浆脉厚度, 测量结果如图 12 所示。

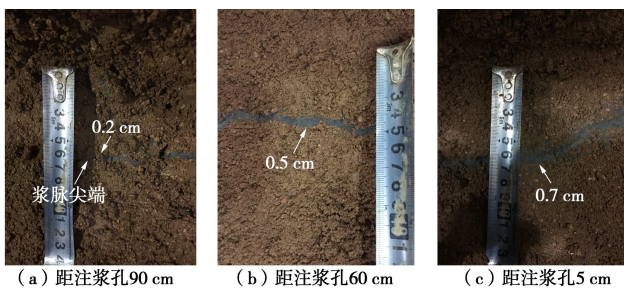


图 12 不同位置浆脉厚度

Fig. 12 Thicknesses of pulse at different positions

浆脉厚度在距离注浆孔 5 cm 处为 0.7 cm , 距离注浆孔 60 cm 处为 0.5 cm , 浆脉尖端处为 0.2 cm , 浆脉厚度由注浆孔向浆脉尖端衰减显著。浆脉尖端的细部放大如图 13 所示, 浆脉尖端处并非为一个角度很小的锐角, 而是存在一定厚度, 浆脉尖端处可发现部分以渗透充填形式存在的浆液, 说明劈裂通道扩展过程中浆液扩散锋面是以类似“钝头”的形式运移, 运移过

程中伴随部分浆液的渗透。

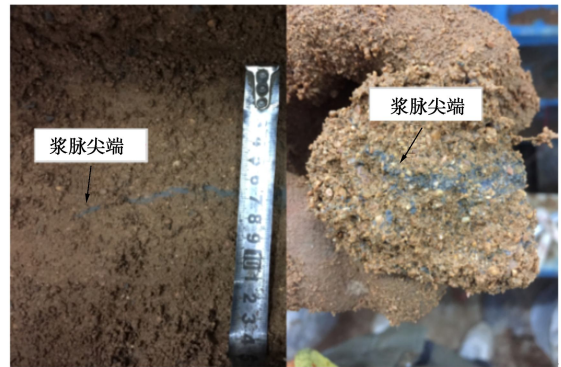


图 13 浆脉尖端细部放大图

Fig. 13 Detail of vein tip

砂层注浆加固效果是由浆脉厚度及砂层压密程度所决定的, 而某一位置处的砂层压密程度与浆脉厚度之间是正相关关系, 当浆脉厚度较大时, 则该处砂层的压密程度也较大。浆脉厚度由注浆孔位置向浆液扩散锋面位置衰减, 对应着砂层压密程度也由注浆孔向扩散锋面处衰减, 也就意味着注浆加固效果沿浆脉扩展方向衰减, 注浆孔附近注浆加固效果最好, 距离注浆孔越远注浆加固效果也越差。

4 砂层应力场及位移场演化规律

4.1 $p-q-t$ 数据

注浆过程中注浆压力与注浆速率的监测数据如图 14 所示。

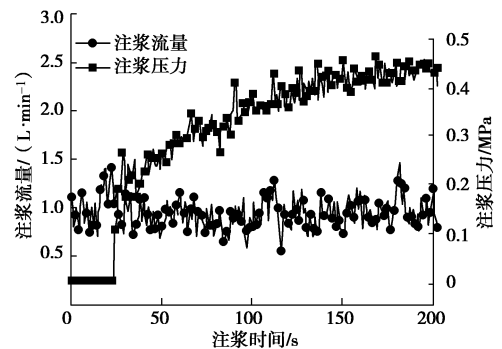


图 14 注浆过程中 $p-q-t$ 数据

Fig. 14 $p-q-t$ data in grouting process

在注浆过程中, 注浆压力与注浆速率均表现出一定的波动性, 这是因为手动注浆泵为活塞往复式注浆泵, 在注浆过程中活塞的往复运动会造成注浆速率及注浆压力的一定波动。注浆速率基本维持在 1 L/min 附近波动, 与试验设计的 1 L/min 的注浆速率相一致。注浆压力在 $0\sim 25\text{ s}$ 内为零, 在注浆开始后浆液首先要充填注浆孔, 此时没有浆液扩散阻力, 所以注浆开始一段时间内注浆压力为 0 。在 $T=25\text{ s}$ 左右时, 注浆

压力发生突变, 从 0 直接上升到了 0.1 MPa 左右, 说明此时浆液已劈开砂层进入劈裂通道扩展阶段, 砂层的起劈压力为 0.1 MPa 左右, 大约是砂层小主应力(50 kPa)的两倍。

当浆液进入砂层后, 注浆压力开始上升, 在注浆前期 (25~50 s), 注浆压力上升很快, 从 0.1 MPa 上升到了大约 0.25 MPa, 在注浆中后期 (50~200 s), 注浆压力上升趋势逐渐变缓, 当劈裂通道尖端距离模型架侧壁还有 10 cm 时结束注浆, 注浆终压为 0.44 MPa。

4.2 应力场演化特征

在距离注浆孔竖向距离 10 cm 的水平面上, 注浆过程中竖向应力的监测数据如图 15 所示, 图中 r 为传感器距离注浆孔的水平距离, h 为传感器距离注浆孔的竖向距离。

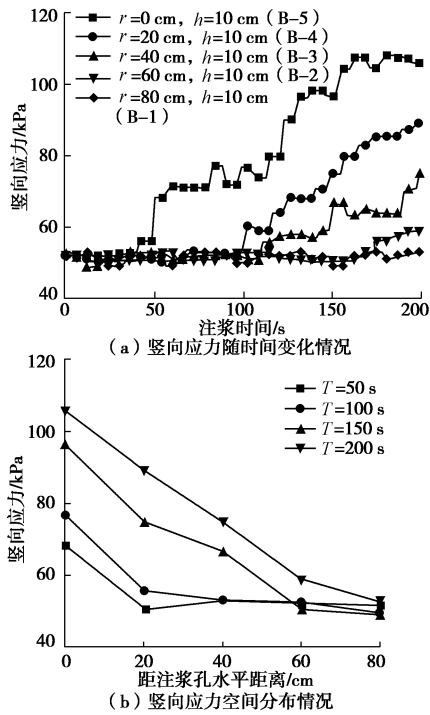


图 15 注浆过程中竖向应力监测数据 ($h=10$ cm)

Fig. 15 Monitoring data of vertical stress ($h=10$ cm)

分析图 15 (a) 可知: 各个位置的竖向应力先后由小主应力数值开始增长, 不同位置竖向应力开始增长的时间起点不同, 距离注浆孔越远, 竖向应力开始增长的时间点越靠后, 特定位置竖向应力开始增长的时间大致对应劈裂通道到达该位置的时间, 说明劈裂通道内的浆液流动对砂层应力场产生了影响, 劈裂通道两侧砂层被有效压密。

分析图 15 (b) 可知, 在不同时刻, 随着距离注浆孔越远, 竖向应力越小, 竖向应力沿着劈裂通道扩展方向衰减。在注浆前期, 由于注浆扩散范围有限,

所以竖向应力在距离注浆孔较近的位置便衰减至初始竖向应力 (小主应力), 在注浆中后期, 随着浆液扩散范围的增大, 竖向应力的空间衰减曲线整体上移。砂层所受竖向应力增大会导致砂层被压密, 砂层压密程度与砂层所受竖向应力一一对应, 也就是说, 砂层压密程度也沿着劈裂通道扩展方向衰减。

距离注浆孔最近的监测位置在注浆孔正上方 10 cm, 此处竖向应力在注浆结束时达到最大值 106 kPa, 而此时孔口注浆压力为 440 kPa, 两者差别显著, 说明沿着劈裂通道垂直方向上, 浆液压力衰减速度非常快, 距离劈裂通道扩展平面 10 cm 位置处的浆液压力只是劈裂通道内浆液压力的 25%左右, 也表明了劈裂-压密注浆的影响范围非常有限。

$h=20, 30, 40$ cm 处的竖向应力监测数据如图 16 所示。在注浆过程中, 6 个监测位置的竖向应力均在小主应力数值附近波动, 尤其是在距离注浆孔竖向距离为 20 cm 的平面上, 竖向应力并没有出现明显的上升。说明在距离劈裂通道扩展平面 20 cm 位置, 注浆已经无法对其造成显著影响。

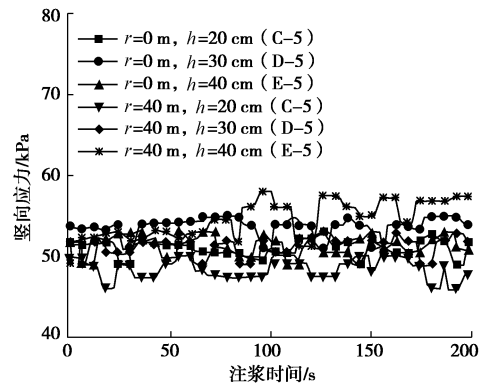


图 16 注浆过程中竖向应力监测数据 ($h=20, 30, 40$ cm)

Fig. 16 Monitoring data of vertical stress ($h=20, 30, 40$ cm)

不同位置的水平应力监测数据如图 17 所示。在注浆过程中, 7 个监测位置的水平应力均在大主应力数值附近波动, 说明注浆扩散过程对水平地应力的影响不大。

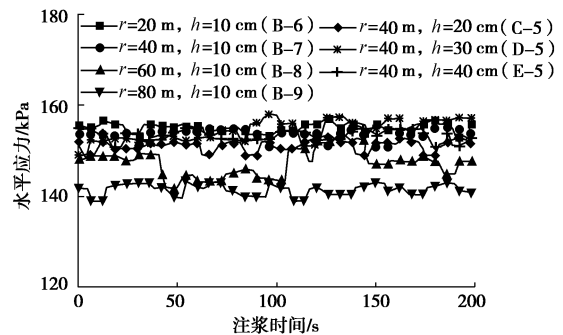


图 17 注浆过程中水平应力监测数据

Fig. 17 Monitoring data of horizontal stress

4.3 位移场演化特征

在距离注浆孔竖向距离 10 cm 的水平面上，注浆过程中竖向位移的监测数据如图 18 所示。

分析图 18 可知： $h=10\text{ cm}$ 水平面上不同位置竖向位移随注浆时间变化过程与相同水平面上不同位置竖向应力的变化基本上是同步的，区别在于竖向位移的增长过程比较平顺，不存在较大的波动。不同时刻竖向位移与竖向应力的空间分布情况也基本一致。

距离注浆孔最近的竖向位移监测位置位于注浆孔正下方 10 cm 处，此处竖向位移在注浆结束时达到最大值 0.399 mm，由砂层注浆加固体开挖揭露的浆脉情况看，距离注浆孔 5 cm 处的浆脉厚度大约为 7 mm，两者相差近 20 倍，表明了劈裂-压密注浆的影响范围非常有限。

距离劈裂通道扩展平面垂直距离为 25, 40 cm 的水平面上，在整个注浆过程中竖向位移均为 0，没有发生任何变化。说明在距离劈裂通道扩展平面 25 cm 位置，注浆已经无法对其造成影响。

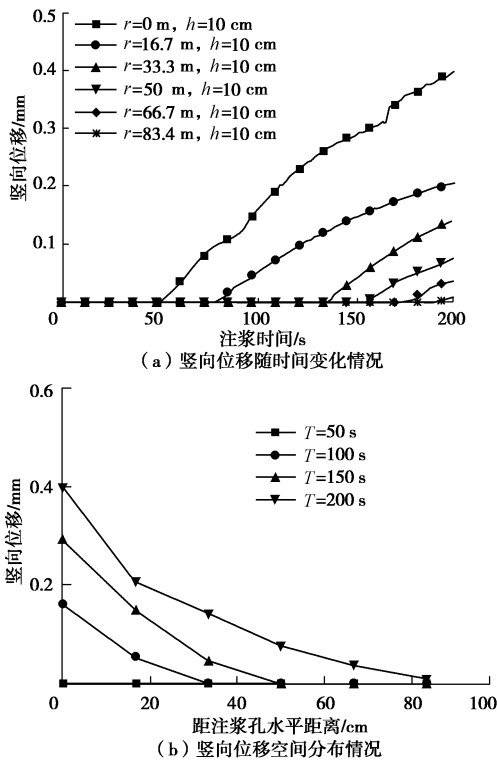


图 18 注浆过程中竖向位移监测数据 ($h=10\text{ cm}$)

Fig. 18 Monitoring data of vertical displacement ($h=10\text{ cm}$)

5 劈裂-压密注浆影响范围分析

砂层应力场、位移场监测结果与注浆孔处的压力、浆脉厚度对比如表 6 所示。

分析表 6 可知，距离劈裂通道扩展平面 10 cm 处，压力衰减程度为 75%，位移衰减程度为 94%，可见劈

裂-压密注浆扩散过程对砂层的影响衰减非常快；在距离劈裂通道扩展平面 20 cm 处，竖向应力等于初始小主应力，压力衰减程度为 100%；在距离劈裂通道扩展平面 25 cm 处，竖向位移为 0，位移衰减程度为 100%。以上对比结果说明注浆影响边界距离劈裂通道扩展平面 10~20cm，考虑到劈裂-压密注浆对劈裂通道两侧砂层都有影响，注浆影响范围应为 20~40 cm，可见劈裂-压密注浆对劈裂通道两侧砂层的影响范围非常有限。

表 6 砂层应力位移与注浆孔处注浆压力、浆脉厚度对比

Table 6 Comparison of stress displacements in sand, pressures on grouting hole and thicknesses of pulse

位置	注浆压力或竖向应力/kPa	注浆影响程度 (应力方面)	浆脉厚度或竖向位移/mm	注浆影响程度 (位移方面)
注浆孔处	401	—	7	—
$r=0\text{ cm}, h=10\text{ cm}$	106	压力衰减程度 75%	0.399	位移衰减程度 94%
$r=0\text{ cm}, h=20\text{ cm}$	50	压力衰减程度 100%	—	—
$r=0\text{ cm}, h=25\text{ cm}$	—	—	0	位移衰减程度 100%

6 工程实践意义

砂层劈裂-压密注浆模式与渗透注浆模式存在显著不同，渗透注浆模式下浆液由注浆孔进入砂层一般会形成比较均匀的注浆加固体，而劈裂-压密注浆模式下一般会形成多条浆脉，注浆加固体具有显著的非均匀性与各向异性，所以对应于劈裂-压密注浆模式的注浆设计方法与传统的基于渗透注浆模式的设计方法有显著的区别。

(1) 单孔注浆量

在劈裂-压密注浆模式下，浆液凝胶固化后最终以浆脉的形式存在于砂层中，单孔注浆量不能依据传统的渗透注浆设计方法进行计算，要综合考虑浆脉厚度空间分布情况以及浆脉延展长度，若注浆量过大，浆脉很容易扩展到目标加固区域以外造成无效注浆以及浆液的浪费。

(2) 钻孔布置

在劈裂-压密注浆模式中，浆脉的展布方向基本与大主应力方向一致，多次注浆产生的浆脉基本上相互平行，根据本文研究成果可知，劈裂-压密注浆对浆脉两侧砂层的影响范围非常有限，在影响范围之外的砂层没有得到有效压密，该区域砂层是整个砂层注浆加固体的薄弱点。在钻孔布置设计中，为避免砂层注浆加固体存在薄弱区，在小主应力方向上应适当减小钻

孔间距, 保证相邻钻孔所对应的浆脉之间不存在未被压密区域(图19)。

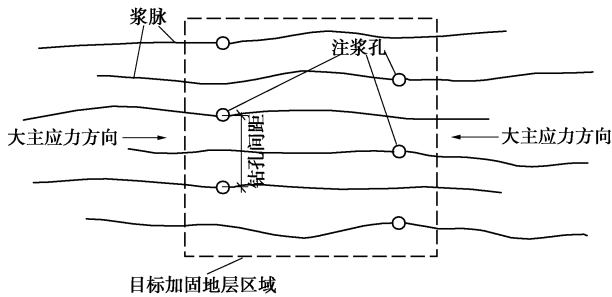


图19 钻孔布置原理图

Fig. 19 Principle of arrangement of drilling holes

7 结 论

(1) 研发了可视化砂层劈裂-压密注浆模拟试验系统, 该系统由模拟试验架、地应力加载模块、注浆控制模块、动态监测模块4部分构成, 可实现劈裂-压密注浆过程的可视化模拟。

(2) 砂层注浆起裂方向与劈裂通道扩展方向均与大主应力方向一致, 劈裂通道扩展过程中浆液扩散锋面是以类似“钝头”的形式运移, 浆脉厚度在浆脉扩展方向上存在明显的衰减, 对应着砂层注浆加固效果由注浆孔向远处衰减。

(3) 注浆会引起与劈裂通道扩展方向垂直方向的应力增加, 且该应力沿劈裂通道扩展方向衰减, 但是注浆对平行劈裂通道扩展方向的应力没有显著影响。

(4) 劈裂-压密注浆对劈裂通道两侧砂层的影响范围非常有限, 在本文试验条件下其注浆影响范围为20~40 cm。

(5) 从单孔注浆量、钻孔布置方面对砂层劈裂-压密注浆设计方法提出了改进建议。

参考文献:

[1] 唐传政, 彭晓秋. 武汉地铁基坑工程地下水问题及其处理对策[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(增刊 1): 410 - 414. (TANG Chuan-zheng, PENG Xiao-qiu. Problems and treatment of groundwater in foundation pits of Wuhan metro[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(S1): 410 - 414. (in Chinese))

[2] 张红军. 上覆富水砂层隧道开挖面稳定性分析与注浆加固对策研究[D]. 济南: 山东大学, 2017. (ZHANG Hong-jun. Study on tunnel face stability and grouting reinforcement for tunnels overlying water-rich sand stratum[D]. Jinan: Shandong University, 2017. (in Chinese))

[3] 刘建国. 富水复杂地质浅埋暗挖隧道修建技术[M]. 北京:

人民交通出版社, 2012. (LIU Jian-guo. Construction technology for the shallowly buried and darkly excavated tunnel in water-rich complex strata[M]. Beijing: China Communications Press, 2012. (in Chinese))

- [4] ZHANG Q, ZHANG L, LIU R, et al. Grouting mechanism of quick setting slurry in rock fissure with consideration of viscosity variation with space[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2017, 70: 262 - 273.
- [5] 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. (in Chinese))
- [6] 房凯, 夏唐代, 包柳青, 等. 考虑滤过效应的卵砾石层浆液扩散研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(7): 1443 - 1448. (FANG Kai, XIA Tang-dai, BAO Liu-qing, et al. Cement grout dispersion considering filtration in gravel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(7): 1443 - 1448. (in Chinese))
- [7] 张连震. 地铁穿越砂层注浆扩散与加固机理及工程应用[D]. 济南: 山东大学, 2017. (ZHANG Lian-zhen. Study on penetration and reinforcement mechanism of grouting in sand layer disclosed by subway tunnel and its[D]. Jinan: Shandong University, 2017. (in Chinese))
- [8] 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, 2006, 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, 2006, 28(12): 2134 - 2138. (in Chinese))
- [9] 钱自卫, 姜振泉, 曹丽文, 等. 弱胶结孔隙介质渗透注浆模型试验研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(1): 139 - 143. (QIAN Zi-wei, JIANG Zhen-quan, CAO Li-wen, et al. Experimental study of penetration grouting model for weakly cemented porous media[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(1): 139 - 43. (in Chinese))
- [10] 宁博, 吴时强, 谢兴华, 等. 渗流作用对砂砾石层灌浆的影响试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(增刊 1): 285 - 289. (NING Bo, WU Shi-qiang, XIE Xing-hua, et al. Experimental study of influence of seepage on grouting in sandy gravels[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(S1): 285 - 289. (in Chinese))
- [11] 李术才, 冯啸, 刘人太, 等. 考虑渗滤效应的砂土介质

- 注浆扩散规律研究[J]. 岩土力学, 2017, **38**(4): 925 - 933. (LI Shu-cai, FENG Xiao, LIU Ren-tai, et al. Diffusion of grouting cement in sandy soil considering filtration effect[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, **38**(4): 925 - 933. (in Chinese))
- [12] 韩伟伟. 基于渗滤效应的水泥浆液多孔介质注浆机理及其工程应用[D]. 济南: 山东大学, 2014. (HAN Wei-wei. Grouting mechanism based on filtration in porous media with cement grout and its engineering application[D]. Jinan: Shandong University, 2014. (in Chinese))
- [13] YOON J, MOHTAR C S E. A filtration model for evaluating maximum penetration distance of bentonite grout through granular soils[J]. Computers and Geotechnics, 2015, **65**: 291 - 301.
- [14] 李鹏, 张庆松, 张霄, 等. 基于模型试验的劈裂注浆机制分析[J]. 岩土力学, 2014, **35**(11): 3221 - 3230. (LI Peng, ZHANG Qing-song, ZHANG Xiao, et al. Analysis of fracture grouting mechanism based on model test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, **35**(11): 3221 - 3230. (in Chinese))
- [15] 张伟杰, 李术才, 魏久传, 等. 三维注浆模型试验系统研制及应用[J]. 岩土力学, 2016, **37**(3): 902 - 911. (ZHANG Wei-jie, LI Shu-cai, WEI Jiu-chuan, et al. Development of a 3D grouting model test system and its application[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, **37**(3): 902 - 911. (in Chinese))
- [16] 张伟杰, 李术才, 魏久传, 等. 富水破碎岩体帷幕注浆模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2015, **37**(9): 1627 - 1634. (ZHANG Wei-jie, LI Shu-cai, WEI Jiu-chuan, et al. Model tests on curtain grouting in water-rich broken rock mass[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, **37**(9): 1627 - 1634. (in Chinese))
- [17] 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, **31**(12): 1818 - 1824. (ZHANG Zhong-miao, ZOU Jian, JIA Jing-yi, et al. Laboratory tests on compaction grouting and fracture grouting of clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, **31**(12): 1818 - 1824. (in Chinese))
- [18] GB/T 50145—2007 土的工程分类标准[S]. 2007. (GB/T 50145—2007 Standard engineering classification of soil[S]. 2007. (in Chinese))

“我与《岩土工程学报》”征文通知

《岩土工程学报》由我国六个一级学会主办, 自1979年创刊至今已经走过了40个春秋。40年来, 在岩土工程界同仁及广大读者的关心支持和全体编者的共同努力下, 学报已经成为我国岩土工程领域中具有重要影响的学术期刊, 是岩土工程理论和实践的重要论坛, 是我国水利水电、交通建筑和油矿资源等领域中从事岩土工程勘测、设计、施工、科学研究和教学等工作人员发表学术观点、交流实践经验的重要园地。《岩土工程学报》为我国培养了一大批岩土工程学科的带头人, 为我国的基础性工程建设事业, 特别是水利工程建设事业做出了重要贡献。学报连续多年被评为“百种中国杰出学术期刊”, 连续获得中国科协精品科技期刊工程项目资助, 并连续多年入选“中国最具国际影响力学术期刊”。

回顾过去的历程, 总结过去的经验, 可以使我们更好地扬帆前行。为了学报更加美好的明天, 为使学报取得更好的发展, 值此创刊40周年之际, 我们决定开展“我与《岩土工程学报》”为主题的征文活动, 并计划出版“《岩土工程学报》创刊40周年纪念文集”。

征文对象: 《岩土工程学报》的读者、作者、审稿人和

编者等。

征文内容(包括但不限于): ①与期刊之间的故事; ②从期刊获得的启示、帮助; ③投稿经历和感受; ④审稿中的付出和辛劳; ⑤主编印象; ⑥参与期刊学术活动的经历和感受; ⑦对期刊今后发展的建议和期望。

征文方式: 征文采用书面稿或电子稿形式, 文内可含插图和照片, 篇幅以2000字左右为宜, 可长可短。书面稿请邮寄至南京虎踞关34号《岩土工程学报》编辑部, 邮编210024, 信封右上角请注明“我与《岩土工程学报》征文”字样; 电子稿件可发至邮箱ge@nhri.cn, 邮件主题请注明“我与《岩土工程学报》征文”。

征文时间: 即日起至2019年6月30日。

优秀论文评选: 编辑部将评选优秀论文, 并对所有优秀论文予以奖励。2019年3月5日之前收到的优秀论文, 将在创刊40周年纪念文集中刊出; 2019年3月6日至6月30日收到的稿件将择优在学报网站或期刊刊出。

竭诚欢迎广大读者踊跃撰文投稿, 其他未尽事宜请向编辑部垂询, 垂询电话: 025-85829534, 85829556。

《岩土工程学报》编辑部