DOI：10.16285/j.rsm.2017.1683

复杂地层超大断面隧道施工围岩力学特征模型试验

刘 聪[1]，李术才[1]，周宗青[1, 2, 3]，李利平[1]，王 康[1]，
侯福金[1, 4]，秦承帅[1]，高成路[1]

（1. 山东大学 岩土与结构工程研究中心，山东 济南 250061；2. 中国矿业大学 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室，江苏 徐州 221116；
3. 河海大学 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室，江苏 南京 210098；4. 山东高速集团有限公司 建设管理公司 山东 济南 250101）

摘 要：以京沪高速济南连接线港沟隧道穿越断裂破碎带区域为依托工程，研究了复杂地层超大断面隧道施工情况下围岩力学响应特征。研发了大型可拼装式地质力学模型试验系统，搭建了以静态数据采集为基础的应力–应变场监测系统和以光栅测距为基础的位移场监测系统，开展了复杂地层超大断面隧道施工过程力学模型试验研究。通过对试验开挖过程中位移变形和围岩应力变化的实时监测，揭示了超大断面隧道穿越断裂破碎带施工过程的力学演化规律。监测数据表明：位移变形大致可分为“缓慢增加—急剧增大—稳定状态”3 个过程，水平收敛位移要早于拱顶沉降进入急剧增大阶段；应力变化也可分为“应力积聚－应力释放－稳定状态”3 个阶段。形成的试验方法技术以及结论对类似工程研究具有重要的指导和借鉴意义。

关 键 词：隧道工程；超大断面；模型试验；施工过程力学；围岩特征

中图分类号：U 457 **文献识别码：**A **文章编号：**1000－7598 (2018) 09－3495－10

Model test on mechanical characteristics of surrounding rock during construction process of super-large section tunnel in complex strata

LIU Cong[1], LI Shu-cai[1], ZHOU Zong-qing[1, 2, 3], LI Li-ping[1], WANG Kang[1],
HOU Fu-jin[1, 4], QIN Cheng-shuai[1], GAO Cheng-lu[1]

(1. Geotechnical and Structural Engineering Research Center，Shandong University, Jinan, Shandong 250061, China; 2. State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China; 3. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China;
4. Shandong Hi-speed Construction Management Co., Ltd., Jinan, Shandong 250101, China)

Abstract: Based on Ganggou tunnel of Jing-hu high-speed connection line road which crossed large fault zones, mechanical characteristics of surrounding rock were studied during the construction process of super-large section tunnels under complex strata. For this purpose, a large-scale three-dimensional assembled geomechanical model test system was designed and developed. The system included stress and strain field monitoring systems based on static data acquisition and a displacement field monitoring system based on raster ranging in order to monitor the mechanical response of surrounding rocks during tunnel excavating. Model tests on mechanics in construction process of super-large section tunnel under complex strata were conducted, and the data of displacement and stress were real-time monitored during testing through the pre-buried monitoring instruments at specific positions in the models. The results indicate that the displacement deformation of both horizontal and subsidence can be divided into three phases: slowly increasing phase, sharply increasing phase and steady state phase. The sharply increasing of horizontal displacement starts earlier than subsidence. Meanwhile, the three phases of stress accumulation, releasing and steady state of stress are also revealed. The research methods and results will guide similar engineering practices.

Keywords: tunnel engineering; super-large section; model test; construction process mechanics; characteristic of surrounding rock

收稿日期：2017-08-14
基金项目：国家自然科学基金项目（No. 51679131, No. 51709159）；中国博士后科学基金资助项目（No. 2017T100492）；中国矿业大学深部岩土力学与地下工程国家重点实验室开放基金项目（No. SKLGDUE K1702）；水文水资源与水利工程科学国家重点实验室开放研究基金（No. 2016491211）。
This work was supported by the National Natural Science Foundation of China(51679131, 51709159), the Postdoctoral Science Foundation of China(2017T100492), the State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining & Technology (SKLGDUE K1702) and the Open Foundation of State Key Laboratory of Hydro-Water Resources and Hydraulic Engineering(2016491211).
第一作者简介：刘聪，男，1990 年生，博士研究生，主要从事隧道工程地质灾害灾变机制与数值模拟方面的研究工作。E-mail: liucong0215@163.com
通讯作者：周宗青，男，1988 年生，博士，助理研究员，主要从事隧道与地下工程重大地质灾害致灾机理与防控方面的研究工作。E-mail: Zongqing.Zhou@sdu.edu.cn

1 引 言

随着我国交通隧道建设数量与规模急剧增加，隧道设计和施工中经常遭遇断裂破碎带等不良地质条件，诱发重大工程灾害事故，造成人身和财产损失。究其原因是对隧道穿越断裂破碎带时复杂的施工过程力学认识不够清晰，未能及时的采取相应的施工工艺和技术措施，造成隧道围岩局部失稳甚至是重大塌方事故的发生。因此，进一步开展隧道施工过程力学研究具有十分重要的意义。

隧道施工开挖与支护会对岩体的力学性质产生重大影响，引起岩体中应力重新分布，围岩结构稳定状态受到破坏，进而容易造成工程事故的发生。朱维申等[1]率先开辟了“岩体动态施工过程力学”这一岩体力学新方向，从力学角度分析了地下工程围岩开挖和支护过程的荷载时空变化，研究了不同施工方案和程序对围岩稳定状态影响规律，同时开展了大量的工程实践应用。近十年，国内学者将施工过程力学的应用研究拓展到一些特殊工程。周飞[2]对黄土隧道施工过程进行有限元模拟，研究了不同施工方法开挖围岩的变形规律。房倩等[3]通过隧道开挖模拟模型试验平台，对典型地质条件下隧道围岩的渐进破坏特点、变形规律进行了系统地研究。宋曙光等[4]针对软弱围岩地层铁路隧道采用台阶法施工过程的力学效应展开了深入研究。张结红[5]对高地应力软岩隧道的施工过程进行了模拟，得出了围岩变形及破坏规律。赵勇等[6]开展了大比尺三维地质力学模型试验，模拟了超大断面铁路隧道真实开挖、支护过程，研究了施工过程中围岩荷载释放规律。仇玉良等[7]采用 FLAC^{3D} 模拟了风积沙地层隧道施工过程，分析了围岩压力释放和沉降发展规律。王者超等[8]以国内首个大型石油水封洞库为工程背景，研究了开挖顺序对洞库渗流场和围岩稳定性的影响规律。林晋海[9]对偏压连拱隧道施工开挖过程的力学特征进行了数值模拟研究。孔超[10]针对高密度城市隧道群的施工过程、支护措施以及围岩稳定性开展了系统地研究，得出施工过程中围岩应力、位移及支护结构受力变化规律。Li 等[11]通过开展大比尺模型试验，研究了海底隧道突水灾变条件，分析了灾变过程中围岩位移、应力、渗压等前兆信息的演化规律。

目前，在隧道施工过程中围岩力学特征演化规律方面的研究主要集中于中等至大断面隧道，并且都是修建于普通地层中，施工过程力学特征较为简单，但是涉及到超大断面隧道穿越断裂破碎带区域时，隧道结构复杂、围岩力学性质多变，施工过程中力学规律难以掌握。为了实现复杂地层超大断面隧道施工过程力学的深入研究，自主研发了大型拼装式地质力学模型试验系统，搭建了以静态数据采集为基础的应力–应变场监测系统和以光栅测距为基础的位移场监测系统，开展了复杂地层超大断面隧道施工过程力学模型试验，分析了隧道穿越断裂破碎带施工过程中围岩位移变形和应力释放规律。

2 超大断面隧道施工过程模型试验系统的研制

为了真实地模拟超大断面小净距隧道在复杂地质条件下施工过程，进一步开展超大断面隧道施工过程中围岩位移变形和应力释放演化规律的研究，自主设计研发了三维拼装式大型地质力学模型试验系统，搭建了以静态应变采集为基础的应力–应变场监测系统和以光栅监测为基础的位移场采集系统，同时研制了柔性三维激光扫描仪，可实时监测隧道开挖断面轮廓变形，捕捉围岩空间变形信息，形成了超大断面隧道施工过程力学模型试验系统。

2.1 组合式试验台架

采用厚壁镀锌方管作为基本组成单元，接头处采用高强螺栓固定，研制了厚壁方管组合式试验台架。按照试验的要求，可以采用不同尺寸的基本单元拼装成不同尺寸和形状的试验台架，组装简单、成本较低，可满足多种非承压式加载地质力学模型试验的科研要求，成为超大断面浅埋小净距隧道围岩空间变形规律模型试验研究的最佳选择[12–14]。试验采用的组装式模型试验台架如图 1 所示。



图 1 组合式试验台架
Fig.1 Combined test frame

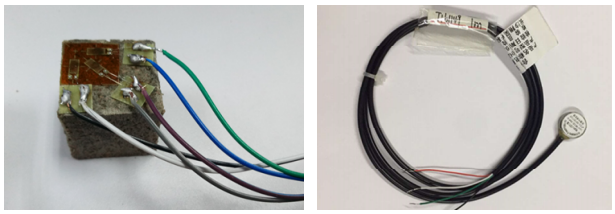
模型试验台架在严格校核受力情况下，尽可能扩大梁柱间隔空间，加以高强度耐力板密封，组成了密闭盒式空间，在保证充足可视化空间的前提下，

解决了以往钢化玻璃易碎的缺点。为了满足本次试验要求，模型架拼装完成后模拟浅埋一侧内部空间为 3 800 mm×1 200 mm×3 400 mm。

2.2　多元信息实时监测系统

2.2.1　应力–应变测试系统

在试验模型体内部埋设的电阻式应变砖，用于实时监测试验开挖过程中隧道围岩的应变和应力变化。电阻式应变砖采用与模型相同配比的相似材料制作而成，尺寸为 3 cm×3 cm×3 cm 的立方体，并在其中一个表面上粘贴 BX120-5CA（XX）型三向应变片。采用长沙翔昊仪器厂生产的 XHZ-401 系列电阻式土压力计实时监测围岩内部压力变化，该压力计具有灵敏度高、体积小、结构简单的特点，适用于室内模型试验中压力的测量。试验模型中埋设的监测元件如图 2 所示。



(a) 应变砖　　(b) 土压力计

图 2　监测元件
Fig.2　Monitoring instruments

采用东华 DH3816N 静态应力–应变测试系统，系统包含全智能化的巡回数据采集模块，每个模块 60 个测点，可用于测点相对较集中的模型或试验，实现对应变应力、力、压力、扭矩、位移、温度等物理量的测量，系统如图 3 所示。该应变测试系统具有测量精度高、扫描速度快、零点漂移小、抗干扰能力强等优点。

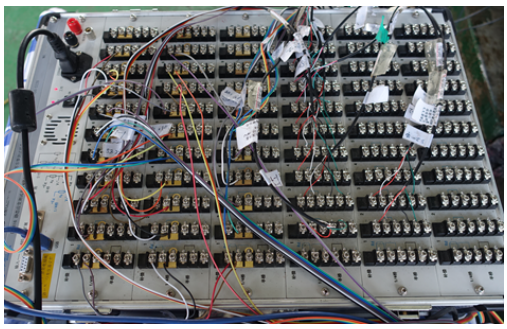
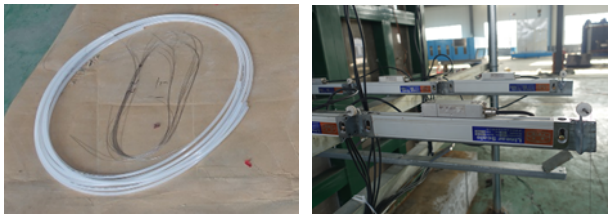


图 3　静态应变测试采集系统
Fig.3　Static strain test system

2.2.2　位移监测系统

试验开挖过程中对模型内部围岩位移变形和顶部地表位移变形进行实时模拟监测，采用山东大学自主研发的基于光栅测距为基础的信号采集分析系统。该系统通过在填筑模型中关键点处埋设多点位移计来监测位移变形，多点位移计组成和光栅尺搭建如图 4 所示。



(a) 柔性测丝及护管　　(b) 光栅尺

图 4　多点位移计和光栅尺
Fig.4　Multi-point extensometer and grating ruler

在试验监测时，多点位移计柔性测丝与高精度光栅尺相连接，锚头处围岩的移动带动测丝，测丝带动光栅尺，然后光栅尺将该位移信息转换为光信号，再进一步转换为数字信号由信号采集分析系统输出[15]，信号采集分析系统如图 5 所示。

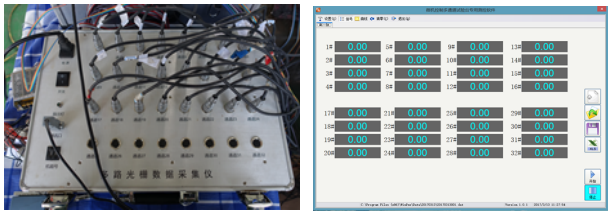


图 5　多路光栅尺信号采集系统
Fig.5　Multi-channel grating information acquisition system

2.3　柔性点云数据监测系统

针对模型试验中隧道开挖围岩位移变形测量技术难度大、及时性差、精确度低、后期处理程序繁杂等问题，自主研发了可用于地质力学模型试验中隧道开挖轮廓变形测量的柔性点云数据监测系统。该监测系统主要由激光测距传感器、数据处理系统和空间位置定位系统组成，如图 6 所示。

该监测系统基于空间动态坐标测量方法，同时融合激光扫描技术与移动视觉系统，可实现对隧道断面或分部断面开挖形状的快速精确测量，具有精度高、自动性高、可视化好等优点，克服了传统测量的不足，方便了模型试验中围岩位移变形数据采集，并且通过数据处理系统可使隧道开挖轮廓变形得到形象而直观的体现。

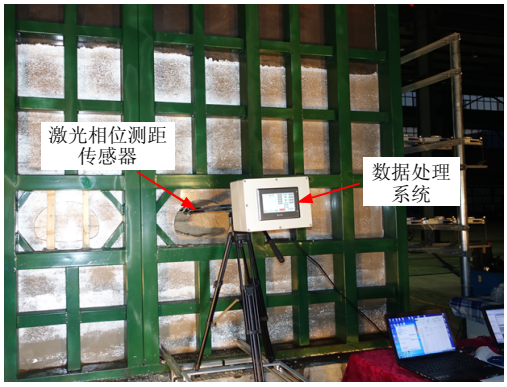


图 6 柔性点云数据监测系统

Fig.6 Flexible point cloud data monitoring system

2.4 支护模拟材料与结构

为了模拟现场喷射混凝土初期支护结构，参考文献[16]选取速干性石膏作为模拟材料，采用水灰比 1∶1.1，控制凝固时间在 7 min 以内，隧道设计初喷混凝土厚度为 300 mm，根据相似比尺换算，试验中控制模拟材料厚度为 6 mm。

模拟材料选定后，确定拱架模拟材料相关参数，选用厚度为 3 mm，宽度为 12 mm 的钢片来模拟现场钢拱架初期支护结构，按照几何相似比尺换算后的尺寸加工钢拱架模型，模拟钢拱架结构如图 7 所示。每一个开挖步完成以后，安装钢拱架结构，并在侧壁上均匀涂抹石膏材料，完成初期支护后，再进行下一循环开挖。



图 7 模拟拱架支护结构

Fig.7 Steel support structure for simulation

3 试验方案设计与实施

3.1 工程背景

在建京沪高速济南连接线控制性工程——港沟隧道，设计为双洞双向 8 车道隧道，最大开挖跨度为 20.008 m，高度为 13.561 m，断面面积达 219.78 m^2，是目前山东省跨度最大的公路隧道，全长 1 105 m，隧道穿越 F1、F2 断裂破碎带区，地质条件复杂，岩体稳定性较差，施工中极容易造成掉块、塌方等工程事故。

试验以隧道穿越 F2 断裂带区域（60 m）为工程背景，左线里程为 ZK10+770～ZK10+830，右线里程为 YK10+765～YK10+825，其中前 20 m 围岩等级为 IV 级，中间 20 m 为断裂破碎带，围压等级为 V 级，后 20 m 围岩等级为 III 级。

地层岩性主要为奥陶系–寒武系灰岩、白云质灰岩，区域地质构造活动影响显著，节理、裂隙带发育。隧道地质剖面图如图 8 所示。

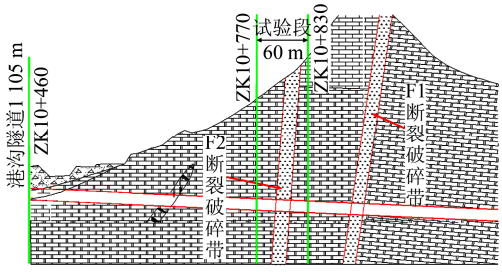


图 8 港沟隧道试验段地质剖面图

Fig.8 Geological profile of Ganggou tunnel at test part

3.2 整体方案设计

为了实现隧道真实的赋存地质情况和施工开挖过程的模拟要求，根据相似基本原理，确定模型试验几何相似比尺为 1∶50，重度相似比尺为 1∶1。开挖支护方案严格按照隧道实际设计方案缩小相应比尺来进行。模型采用相似材料的物理力学参数如表 1 所示。参考文献[17–18]中的所研发相似材料的基本组分，根据模型的物理力学参数调整各组分含量，设计配比试验，开展物理力学参数测试，研制出适用于本试验的相似材料，具体配比如表 2 所示。

表 1 围岩与相似材料力学参数

Table 1 Mechanics parameters of surrounding rock and similar material

围岩级别	类型	重度 γ /(kN/m^3)	弹性模量 E /GPa	抗压强度 σ_c /MPa	泊松比 υ	黏聚力 c /MPa	内摩擦角 φ /(°)
III 级	岩体	23.00	16.00	30.20	0.28	2.500	39.0
III 级	模型	22.87	0.32	0.61	0.30	0.052	38.7
IV 级	岩体	20.00	8.00	16.80	0.30	1.300	30.0
IV 级	模型	20.05	0.16	0.34	0.31	0.025	31.4
V 级	岩体	18.00	3.00	8.40	0.35	0.600	23.0
V 级	模型	18.31	0.06	0.17	0.36	0.012	22.5

表 2　相似材料最终配比
Table 2　Final ratio of similar material

围岩级别	砂：碳酸钙：铁粉：水泥：硅油：氯化石蜡配比
III 级	1.000:0.086:0.068:0.070:0.025:0.107
IV 级	1.000:0.092:0.074:0.055:0.026:0.092
V 级	1.000:0.062:0.062:0.028:0.011:0.070

3.3　监测方案设计

采用多点位移计、微型土压力盒和电阻式应变砖等监测元件，进行隧道开挖过程中围岩位移变形、应力演化过程的多元信息监测与采集。模型断裂破碎带区段设计 1 个监测断面，断面内埋设应变砖、土压力计和多点位移计等监测元件。图 9 为设计监测断面位置示意图，图 10 为各类监测元件埋设位置示意图。

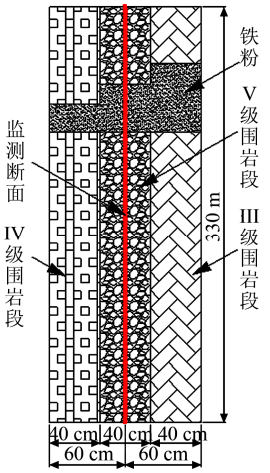


图 9　监测断面位置示意图
Fig.9　Scheme of monitoring section position

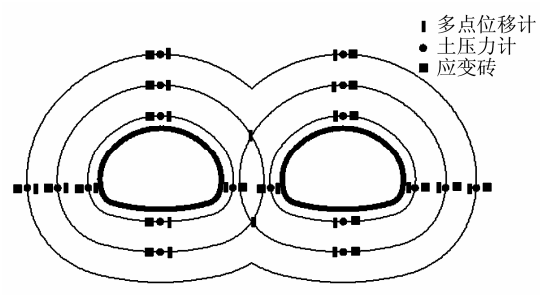
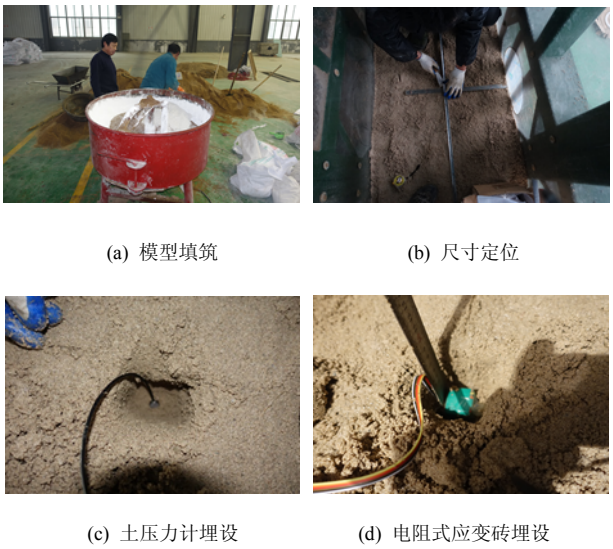


图 10　监测元件埋设位置示意图
Fig.10　Scheme of monitoring instruments position

3.4　模型填筑与监测元件埋设

按照设计方案，试验模型采用分级、分段、分层填筑，逐层夯实的方法进行制作。其制作流程分为以下几个步骤：① 按照各级围岩相似材料配比分别称取各组分原材料；② 将各固体类原材料加入搅拌机并充分搅拌均匀；③ 加入液体类原材料并充分搅拌均匀；④ 将模型试验台架内部空间按照设计分段隔开，每段倒入相应的相似材料，并摊铺均匀；⑤ 逐层夯实，并确保各层材料密实度相同；⑥ 按照监测设计方案，当模型填筑到相应位置处，埋设相应的监测元件；⑦ 继续填筑，将模型顶部相似材料置换为不同厚度的铁粉，以实现真实情况下隧道埋深的模拟，铁粉填充如图 9 所示。具体填筑与监测元件埋设过程如图 11 所示。



(a) 模型填筑　　(b) 尺寸定位

(c) 土压力计埋设　　(d) 电阻式应变砖埋设

图 11　模型填筑与监测元件埋设
Fig.11　Burying of model filling and monitoring instruments

模型填筑完成后，进行室温条件下养护，相似材料达到设计要求后，安装光栅尺、静态应变采集仪等外部数据采集设备，准备就绪后，进行隧道施工过程的试验模拟。地质力学模型试验系统整体如图 12 所示。

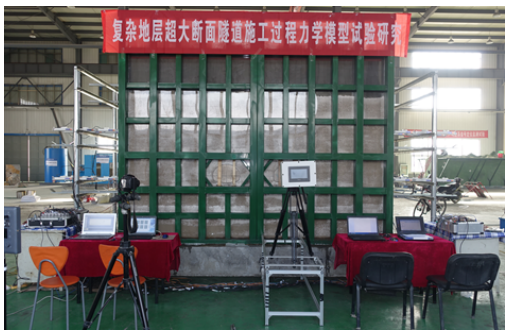


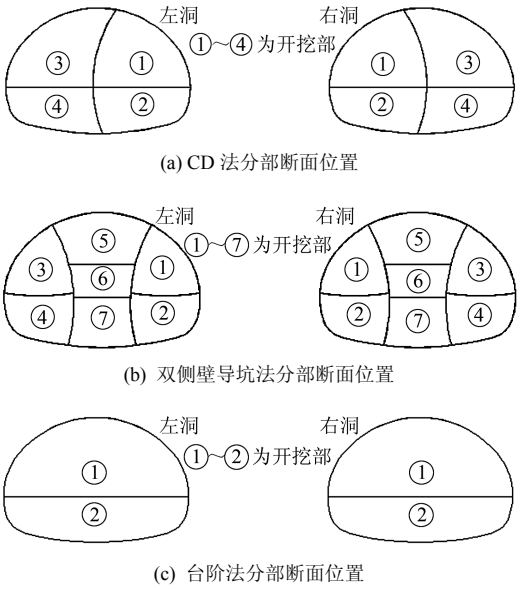
图 12　地质力学模型试验系统
Fig.12　Geomechanical model test system

3.5　模型开挖与支护过程

待监测与信息采集系统调试完毕后，开始试验

模型的开挖，开展超大断面隧道穿越复杂地层施工过程的模拟。

为了真实地模拟依托工程的实际施工情况，试验设计开挖方案为分段分部开挖，不同围岩段采用不同的施工方案。具体开挖方案为 CD 法→双侧壁导坑法→上下台阶法，其中 CD 法开挖 IV 级围岩段 40 cm（模拟实际工况 20 m），以 2.0 cm 为开挖基本单元，每循环持续 3 个基本单元，共进尺 6.0 cm（模拟实际工况进尺 3 m）；双侧壁导坑法开挖 V 级围岩段（断裂破碎带）为 40 cm（模拟实际工况 20 m），以 1.2 cm 为开挖基本单元，每循环持续 3 个基本单元，共进尺 3.6 cm（模拟实际工况进尺 1.8 m）；台阶法开挖 III 级围岩段为 40 cm（模拟实际工况 20 m），以 2.4 cm 为开挖基本单元，每循环持续 3 个基本单元，共进尺 7.2 cm（模拟实际工况进尺 3.6 m）。图 13 是试验中隧道开挖方案各分部横断面示意图，图 14 是不同围岩段分部开挖顺序示意图。



(a) CD 法分部断面位置

(b) 双侧壁导坑法分部断面位置

(c) 台阶法分部断面位置

图 13 隧道开挖分部示意图

Fig.13 Schematic of tunnel excavation section

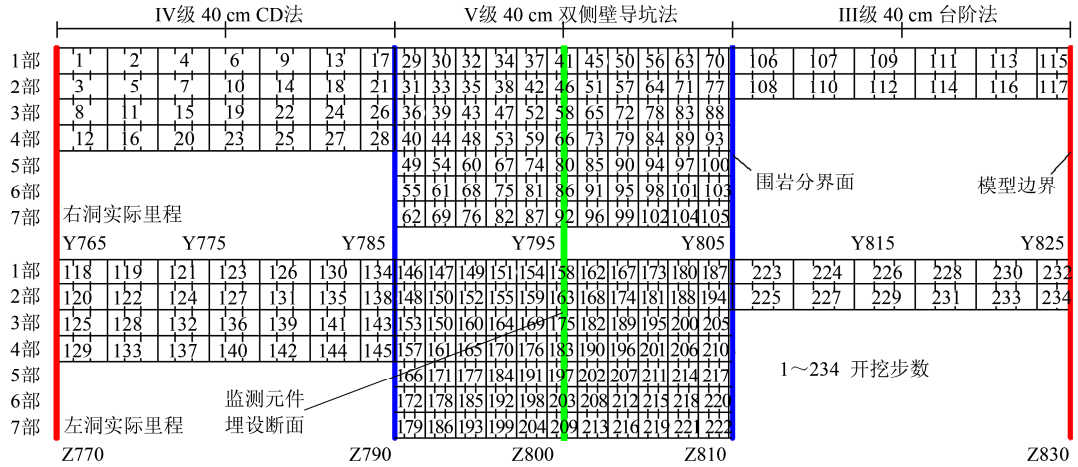


图 14 隧道各分部开挖顺序示意图

Fig.14 Schematic of tunnel section excavation order

试验中先行开挖右洞，每循环开挖完成后，立即进行模拟拱架和初喷支护，待支护工序完成后再进行下一个循环的开挖。当 CD 工法①分部开挖至 IV 级围岩和 V 级围岩分界面时即停止开挖，待②～④分部相继开挖至交界面后，再转换为双侧壁导坑法开挖 V 级围岩段，实现 CD 法、双侧壁导坑法的第 1 次工法转换。在 V 级围岩和 III 级围岩交界面处双侧壁导坑法、台阶法第 2 次工法转换过程同上述类似。待右洞开挖、支护过程全部完成后，再进行左洞的开挖，左洞开挖顺序与右洞类似，在此不再赘述。具体开挖与支护过程如图 15 所示。

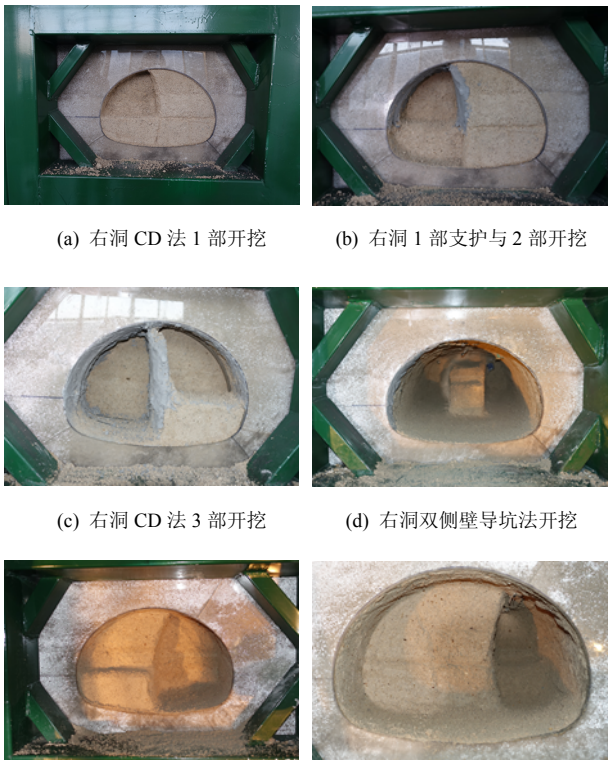
4 结果分析

根据试验设计方案，V 级围岩段采用双侧壁导坑法开挖，IV 级围岩段采用 CD 法开挖，III 级围岩段采用上、下台阶法开挖，在 V 级围岩断裂破碎带内埋设 1 个监测断面，当施工掌子面经过监测断面时围岩应力将发生显著变化，且不同部位不同方向的应力和位移演化规律不同，着重选取拱顶沉降和边墙水平收敛位移、拱顶竖向应力和边墙水平应力开展系统分析，深入地研究穿越断裂破碎带超大隧道开挖过程的力学演化规律。试验中所测得位移和应力均按照相似比进行了换算，试验分析的数据与工程原型的数量级相同。

4.1 拱顶沉降演化规律

在隧道开挖过程中通过对监测断面内拱顶沉降

进行实时监测，研究了隧道穿越断层破碎带前后隧道拱顶沉降变化规律。图 16 为 V 级围岩段断裂破碎带内拱顶沉降随开挖步数变化。



(a) 右洞 CD 法 1 部开挖　(b) 右洞 1 部支护与 2 部开挖

(c) 右洞 CD 法 3 部开挖　(d) 右洞双侧壁导坑法开挖

(e) 左洞 CD 法开挖　(f) 左洞双侧壁导坑法开挖

图 15　开挖、支护与信息监测过程

Fig.15　Excavation, supporting and information monitoring process

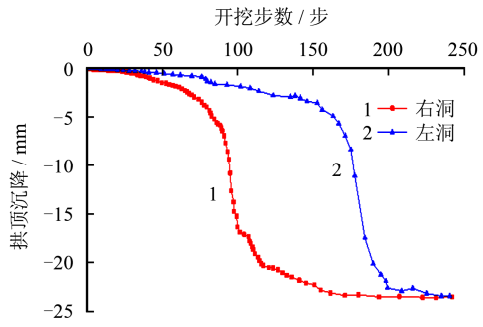


图 16　拱顶沉降随开挖步数变化

Fig.16　Variations of vault subsidence with excavation steps

由图 16 可以看出，开挖初期（步数小于 30），左、右洞拱顶沉降位移均未发生明显变化，当开挖步数大于 30 时，掌子面进入断裂破碎带，右洞拱顶沉降开始呈线性缓慢增加；当开挖 80 步左右时，右洞双侧壁导坑法⑤分部掌子面到达监测断面位置，右洞拱顶沉降急剧增大；当开挖步数大于 100 时，⑤分部掌子面进入 III 级围岩段，拱顶沉降位移速率暂时减缓；继续开挖，沉降值再次急剧增大，直至开挖步数大于 110 步时，台阶法开挖掌子面距离监测断面大于 1B（B 为开挖跨度），拱顶沉降速率减小，围岩变形趋于稳定。

左洞拱顶沉降整体演化趋势与右洞类似，也经历了“缓慢增加－急剧增大－稳定状态”的过程。当右洞开挖 70 步左右时，左洞未开始开挖，拱顶沉降开始产生并缓慢增加，这是由于断裂破碎带岩体破碎，开挖扰动大引起的。因此，在隧道施工穿越断裂破碎带时应尽早采取加强支护措施，提前控制围岩变形，确保施工安全。

4.2　水平位移演化规律

试验开挖过程中通过对监测断面内拱腰处水平位移进行实时监测，得到了隧道拱腰处水平位移随开挖步数的变化规律，如图 17 所示。

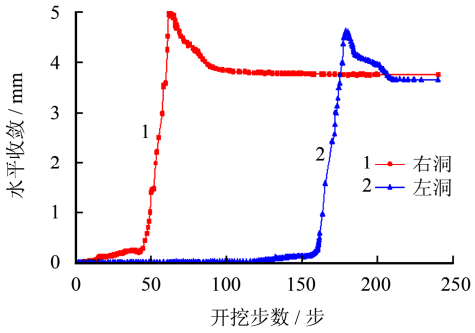


图 17　水平位移随开挖步数变化

Fig.17　Variations of horizontal displacement with excavation steps

由图可以看出，当开挖 40 步，双侧壁导坑法①分部率先进入断裂破碎带区域开始开挖，拱腰处水平位移开始急剧增大，直至 65 步时水平收敛位移达到最大值，此时双侧壁导坑法④分部开挖至监测断面位置；随后水平收敛位移有所减小，最后趋于稳定，可能是由于开挖进入 III 级围岩段后，采用台阶法施工对水平收敛有一定的控制作用。左洞水平收敛位移急剧增大发生于开挖 160 步左右，此时左洞②分部掌子面位于监测断面处，水平收敛位移最大值发生在开挖 180 步左右，此时④分部开挖掌子面位于监测断面处。

整体来说，隧道施工过程中位移变形大致可分为“缓慢增加－急剧增大－稳定状态”3 个过程，双侧壁导坑法分部开挖阶段洞室水平收敛位移发生急剧变化要早于拱顶沉降，在现场开展围岩变形监控量测时可优先考虑作为施工安全的参考指标。

4.3　拱顶竖向应力释放规律

选取监测断面内拱顶竖向应力和边墙处水平应力进行系统分析，研究应力随开挖步数的变化规律。

图 18 为 V 级围岩段隧道拱顶竖向应力随开挖步数变化曲线。由图可以看出，当 IV 级围岩段开始开挖时，拱顶竖向应力出现短暂的增大现象，这是由于监测断面与模型边界的距离只有 1.5B，开挖扰动作用可以传递到监测断面处，引起拱顶应力发生集聚；当开挖 30 步左右时，双侧壁导坑法①分部和③分部开始进入断裂破碎带段，拱顶应力开始迅速释放；随后应力释放速率有所减缓，随着开挖步数基本呈台阶状变化，这是由于各分部开挖扰动作用对拱顶应力影响程度不同引起的，①、③、⑤分部开挖扰动对拱顶应力变化影响最为明显；当开挖 80 步左右时，⑤分部掌子面开挖至监测断面处，应力释放率达到最大，应力释放达到最小值；随后，由于施作支护，拱顶竖向应力又有所小幅度回升，待开挖 100 步后，掌子面进入 III 级围岩段，竖向应力变化趋于稳定。

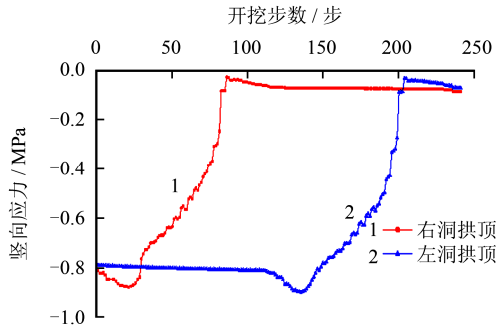


图 18 拱顶竖向应力随开挖步数变化

Fig.18 Variations of vault vertical stress with excavation steps

左洞拱顶应力释放过程与右洞相类似。当开挖 120 步左右时，左洞①分部开始开挖，左洞竖向应力发生积聚现象；开挖 150 步时，拱顶竖向应力进入释放阶段，持续至 200 步左右应力释放完毕，此时⑤分部掌子面刚好进入监测断面；随后，在支护施作完毕，开挖面进入 III 级围岩段，应力经历小幅度回升后，趋于稳定状态。

4.4 边墙水平应力释放规律

图 19 为 V 级围岩段隧道边墙水平应力随开挖步数变化曲线。可以看出，右洞边墙水平应力积聚阶段发生在开挖 40～55 步，此时两侧导坑①～④分部掌子面进入断裂破碎带区域；应力释放阶段发生在开挖 55～60 步，此时③、④分部开挖掌子面经过监测断面，应力释放率达到最大值，水平应力得到迅速释放；随着支护措施的施作以及开挖进入 III 级围岩阶段，应力成阶梯式回升，最后趋于稳定。

左洞水平应力积聚现象发生在开挖 150～160 步之间，应力释放发生在开挖 160～165 步阶段，应力释放率要低于右洞，在开挖 200 步时经历短暂回升后趋于稳定。整体来说，边墙水平应力释放规律与其拱顶竖向应力释放规律相似，大致分为“应力积聚—应力释放—稳定状态”3 个阶段。在进入距离监测断面 1B 范围内，产生开挖扰动效应，引起应力积聚现象；当开挖掌子面经过监测断面时，应力会得到迅速释放；当开挖掌子面远离监测断面（1B 范围外）时，应力再次趋于稳定状态。

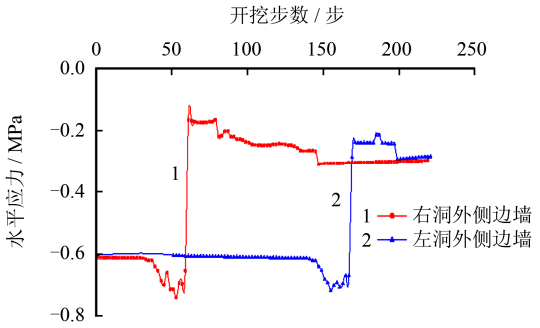


图 19 边墙水平应力随开挖步数变化

Fig.19 Variations of horizontal stress with excavation steps

5 结 论

以京沪高速济南连接线港沟隧道穿越断裂破碎带区段为工程依托，开展了复杂地层超大断面隧道施工过程力学模型试验，深入研究了超大断面隧道施工过程中围岩的位移变形和应力释放规律，主要形成以下结论：

（1）研制了厚壁方管组合式试验台架，可通过自由组装基本单元用于不同尺寸和形状试验模型的填筑。构建了多元信息实时监测与数据采集系统，形成了复杂地层超大断面隧道施工过程力学模型试验系统，可实现隧道开挖过程中多元信息的实时监测。为超大断面隧道穿越复杂地质带施工过程中围岩力学演化规律的研究提供了技术支撑。

（2）开展了超大断面隧道穿越断层破碎带施工过程力学模型试验研究，试验中分段、分级填筑建立隧道地质模型，试验中按照现场施工方案模拟了隧道真实的分段、分部开挖过程，同时试验中实时监测隧道拱顶和边墙处位移变形以及围岩应力变化，揭示了超大断面隧道施工过程中位移变形和应力释放规律。

（3）隧道施工开挖过程中位移变形会经历“缓慢增加—急剧增大—稳定状态”3 个基本过程，在采

用双侧壁导坑法分部开挖阶段洞室水平收敛早于拱顶沉降进入急剧增大阶段，但是水平收敛最终变形量要明显小于拱顶沉降。

（4）在开挖过程中围岩应力变化大致分为“应力积聚—应力释放—稳定状态”3 个阶段。在距离监测断面 1B 范围内，会产生开挖扰动效应，引起应力积聚现象；当开挖掌子面经过监测断面时，应力会得到迅速释放；当掌子面远离监测断面 1B 后，应力再次趋于稳定状态。

（5）成果可为隧道穿越断裂破碎带区段施工方案的合理设计以及支护结构施作最佳时机的确定提供重要的指导意义。

参 考 文 献

[1] 朱维申, 李术才, 白世伟, 等. 施工过程力学原理的若干发展和工程实例分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(10): 1586－1591.
ZHU Wei-shen, LI Shu-cai, BAI Shi-wei, et al. Some developments of principles for construction process mechanics and some case history studies[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, 22(10): 1586－1591.

[2] 周飞. 软弱黄土隧道施工过程力学分析[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2010.
ZHOU Fei. Mechanical analysis of weak loess tunnel construction[D]. Xi’an: Xi’an University of Architecture and Technology, 2010.

[3] 房倩, 张顶立, 王毅远, 等. 圆形洞室围岩破坏模式模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(3): 564－571.
FANG Qian, ZHANG Ding-li, WANG Yi-yuan, et al. Model test study of failure modes of surrounding rock for circular caverns[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(3): 564－571.

[4] 宋曙光, 李术才, 李利平, 等. 超大断面隧道软弱破碎围岩台阶法施工过程力学效应规律研究[J]. 隧道建设, 2011, 31(增刊 1): 170－175.
SONG Shu-guang, LI Shu-cai, LI Li-ping, et al. Study on rules of mechanical effect in process of construction of super-large cross-section tunnel in weak and broken surrounding rock excavated by bench method[J]. **Tunnel Construction**, 2011, 31(Supp.1): 170－175.

[5] 张结红. 高应力软岩隧道施工过程力学效应规律及围岩控制研究[D]. 西安: 长安大学, 2012.
ZHAO Jie-hong. Mechanical effect and surrounding rock mass control of high stress and soft-surrounding rock tunnel in process of construction[D]. Xi’an: Chang’an University, 2012.

[6] 赵勇, 李术才, 赵岩, 等. 超大断面隧道开挖围岩荷载释放过程的模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(增刊 2): 3821－3830.
ZHAO Yong, LI Shu-cai, ZHAO Yan, et al. Model test study of surrounding rock load releasing during super-large section tunnel excavation[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2012, 31(Supp.2): 3821－3830.

[7] 仇玉良, 姚红志, 胡晓勇, 等. 风积沙地层大跨公路隧道施工过程力学行为分析[J]. 中国公路学报, 2012, 25(3): 112－119.
QIU Yu-liang, YAO Hong-zhi, HU Xiao-yong, et al. Mechanical behavior in the construction of large span highway tunnel in Aeolian sand strata[J]. **Chinese Journal of Highway and Transport**, 2012, 25(3): 112－119.

[8] 王者超, 李术才, 薛翊国, 等. 大型地下水封石油洞库施工过程力学特性研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(1): 275－282.
WANG Zhe-chao, LI Shu-cai, XUE Yi-guo, et al. Mechanical properties of surrounding rocks of large water-sealed underground oil storage caverns during construction process[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2013, 34(1): 275－282.

[9] 林晋海. 偏压联拱隧道施工过程力学数值模拟分析[J]. 兰州交通大学学报, 2015, 34(4): 74－79.
LIN Jin-hai. Model test research on the zonal disintegration in deep rock[J]. **Journal of Lanzhou Jiaotong University**, 2015, 34(4): 74－79.

[10] 孔超. 大规模高密度城市隧道群施工力学行为研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2016.
KONG Chao. Study of construction mechanics behavior of large and adjacent urban tunnel groups[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016.

[11] LI S C, LIU H L, LI L P, et al. Large scale three-dimensional seepage analysis model test and numerical simulation research on undersea tunnel[J]. **Applied Ocean Research**, 2016, 59: 510－520.

[12] 王康. 超大断面小净距隧道施工围岩空间变形与荷载释放机制及工程应用[D]. 济南: 山东大学, 2017.
WANG Kang. Spatial deformation and load release mechanism of surrounding rock in tunnel construction with super-large section and small spacing and its engineering application[D]. Jinan: Shandong University,

2017.

[13] 安建永, 项彦勇, 贾永州. 既有桩基荷载对邻近浅埋隧道开挖效应及支护内力影响的研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(4): 926－933.
AN Jian-yong, XIANG Yan-yong, JIA Yong-zhou. Study of influences of existing pile foundation loads on adjacent tunnel excavation and internal forces of primary support[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(4): 926－933.

[14] 刘泉声, 彭星新, 雷广峰, 等. 特大断面浅埋暗挖隧道十字岩柱开挖技术模型试验研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(10): 2780－2788.
LIU Quan-sheng, PENG Xing-xin, LEI Guang-feng, et al. Geomechanical model test on excavation technology of supper-large cross-section ultra-shallow tunnel with cross rock pillar method[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(10): 2780－2788.

[15] 李龙起, 巨能攀. 光栅测试技术在顺层边坡降雨模型试验中的应用研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(7): 2119－2127.
LI Long-qi, JU Neng-pan. Model test on bedding rock slope under rainfall conditions based on fiber grating technology[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(7): 2119－2127.

[16] 江贝. 超大断面隧道软弱围岩约束混凝土控制机理及应用研究[D]. 济南: 山东大学, 2016.
JIANG Bei. Control mechanism and application of confined concrete for super large section tunnel on weak surrounding rock[D]. Jinan: Shandong University, 2016.

[17] 石少帅. 深长隧道充填型致灾构造渗透失稳突涌水机理与风险控制及工程应用[D]. 济南: 山东大学, 2014.
SHI Shao-shuai. Study on seepage failure mechanism and risk control of water inrush induced by filled disaster structure in deep-long tunnel located at three gorges reservoir[D]. Jinan: Shandong University, 2014.

[18] 王凯, 李术才, 张庆松, 等. 流–固耦合模型试验用的新型相似材料研制及应用[J]. 岩土力学, 2016, 37(9): 2521－2533.
WANG Kai, LI Shu-cai, ZHANG Qing-song, et al. Development and application of new similar materials of surrounding rock for a fluid-solid coupling model test[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(9): 2521－2533.

上接第 3494 页

《岩土力学》2017 年第 11 期被 EI 收录论文（39 篇，收录率 100 %）（2）

序号	论文题名	作者	页码
17	非静水应力场中圆形隧道衬砌与围岩间两种接触的黏弹性解析	储昭飞，刘保国，刘开云，等	3215－3224
18	微生物沉积碳酸钙固化砂土试验研究	孙潇昊，缪林昌，童天志，等	3225－3230
19	红层软岩遇水崩解特性试验及其界面模型	潘 艺，刘 镇，周翠英	3231－3239
20	分数阶导数黏弹性饱和土体一维固结半解析解	解 益，李培超，汪 磊，等	3240－3246
21	酸腐蚀后灰岩动态压缩力学性质的试验研究	李光雷，蔚立元，靖洪文，等	3247－3254
22	透水桩与不透水桩组合型复合地基固结解析分析	于春亮，张爱军，赵庆玉，等	3255－3260
23	循环荷载下土体变形特性研究	浦少云，饶军应，杨凯强，等	3261－3270
24	考虑非饱和渗流与增湿膨胀下的膨胀土隧道稳定性分析	郑俊杰，郭震山，崔 岚，等	3271－3277
25	隧道正交穿越滑坡体的安全距离及稳定性分析	张治国，徐晓洋，姜蕴娟，等	3278－3286
26	层状非均质性对 CO_2 在盖层中迁移泄漏规律的影响	高 帅，魏 宁，李小春，等	3287－3294
27	软土区基坑预降水引起支护墙侧移的典型参数影响研究	曾超峰，薛秀丽，郑 刚	3295－3303
28	高温冻土区 U 型块石路基长期降温效果及变形特征研究	刘明浩，牛富俊，林战举，等	3304－3310
29	成层地基中单桩竖向承载力鲁棒性设计	张 峰，周 峰，王旭东	3311－3318
30	基于抛物索理论的加筋土调整不均匀沉降研究	王宗建，马书文，卢 谅	3319－3324
31	软黏土中伞式吸力锚基础水平承载有限元分析	刘红军，张 浩，李洪江，等	3325－3331
32	岩体离散裂隙网络的非饱和渗流数值分析	叶祖洋，姜清辉，刘艳章，等	3332－3340
33	相关变量生成算法及边坡可靠度 Monte Carlo 模拟	陈将宏，李建林，许晓亮，等	3341－3346
34	地震动在地下采场开挖边界的耦合数值分析	汪 昕，蔡 明	3347－3354
35	基于贝叶斯理论的土性参数空间变异性量化方法	田 密，李典庆，曹子君，等	3355－3362
36	确定渗析平衡时间的数值模拟方法	李 芃，谭晓慧，辛志宇，等	3363－3370
37	基于时变监测数据的降雨滑坡多目标随机反分析	郑亚飞，张璐璐，张 洁，等	3371－3377
38	减饱和松砂静态液化的水–气两相流耦合分析	方 志，陈育民，何森凯，等	3378－3384
39	基于点云数据对齐技术的岩体结构面三维吻合度求取	葛云峰，陈 勇，王亮清，等	3385－3394