

DOI: 10.11779/CJGE20221309

受限场地装配式管廊穿越活动地裂缝土压力演化规律研究

徐强^{1,2}, 白超宇¹, 彭建兵^{1,2}, 卢全中^{1,2}, 李文阳¹

(1. 长安大学地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054; 2. 自然资源部矿山地质灾害机理与防治重点实验室, 陕西 西安 710054)

摘要: 地下综合管廊穿越活动地裂缝时, 必将受到地裂缝活动作用影响。为探明地裂缝活动对装配式综合管廊周围土体应力分布的影响, 通过物理模型试验, 对活动地裂缝作用下管廊与土体接触压力和管廊周围土体压力变化进行了监测, 监测土压力位置分别是模型箱底板轴线、管廊底板轴线、管廊底板侧边线、模型箱侧壁以及管廊顶板轴线。试验结果表明, 在地裂缝活动作用下, 地层裂缝首先出现在管廊下部的地裂缝处, 初期反映为剪切裂缝, 地表裂缝处于受拉状态; 管廊变形对土体竖向应力影响主要集中地裂缝处与管廊上盘末端, 上盘土体的受力状态较为稳定, 而土层中应力重新分布主要集中在下盘管廊底部, 地裂缝活动时, 管廊变形对周围土体的影响幅度从底板中线两侧逐渐衰减。研究成果可对地裂缝多发地区装配式管廊的灾害防治与地基处理提供借鉴。

关键词: 装配式; 地下综合管廊; 地裂缝; 土压力; 应力分布

中图分类号: TU432; U452.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2023)08-1615-10

作者简介: 徐强(1986—), 男, 陕西榆林人, 讲师, 从事结构灾害评估及工程抗震方面的教学与研究工作。E-mail: 538270385@163.com。

Evolution of soil pressure of prefabricated utility tunnel crossing active ground fissures in confined site

XU Qiang^{1,2}, BAI Chaoyu¹, PENG Jianbing^{1,2}, LU Quanzhong^{1,2}, LI Wenyang¹

(1. College of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 2. Key Laboratory of Mine Geological Hazards Mechanism and Control, Ministry of Natural Resources, Xi'an 710054, China)

Abstract: The underground utility tunnel is inevitably affected by ground fissures when crossing active ground fissures. The distribution of soil stress around the utility tunnel is studied through a large physical model test by monitoring the contact pressure between the soil and the structure around the utility tunnel. The monitoring positions are located at the bottom axis of the test box, bottom axis of the utility tunnel, bottom side line of the utility tunnel, side wall of the test box and top axis of the utility tunnel respectively. The results show that the cracks first appear near the preset ground fissure with a shear state, leading to tension state at the top face of soil. The effects of the deformation of the utility tunnel on soil stress are mainly concentrated at the end of the hanging wall and the position near the ground fissure. The stress state of the soil in hanging wall is relatively stable. However, the stress redistribution is mainly at the bottom of the utility tunnel, and the effects of the deformation of the utility tunnel on the surrounding soil decrease from the bottom axis to the sides gradually. The research results can be used for disaster prevention and foundation treatment of prefabricated utility tunnels in the areas with frequent ground fissure disasters.

Key words: prefabricated type; underground utility tunnel; ground fissure; soil pressure; stress distribution

0 引言

地下综合管廊是城市地下空间开发利用的重要形式之一, 1833年法国巴黎建成世界上第一条地下管线综合管廊, 19世纪60年代末为适应现代城市管线种类多和铺设要求高的特点, 法国将综合管廊的断面改成了矩形。目前对管廊的研究主要有管廊的力学响应与灾害响应等^[1-5]。

地裂缝是西安市主要的地质灾害之一^[6-7], 自西安发现地裂缝以来, 西安城区基本查清14条活动地裂缝, 每条地裂缝长度达数千米到数十千米, 总长已超

基金项目: 国家自然科学基金项目(41807243; 41877250); 国家自然科学基金重大项目(41790441); 中央高校基金项目(300102269101; 300102268206; 300102260402)

收稿日期: 2022-10-24

通信作者(E-mail: dicexy_1@126.com)

过 200 km, 覆盖面积约 250 km²。地裂缝活动对线型工程的安全性具有极大的隐患^[8-11]。

目前西安地裂缝的活动性较过去有所减缓, 但是仍保持在 1~5 mm/a, 地裂缝活动的长期累积位错必将对管廊的建设产生不利影响。闫钰丰等^[13]研究了管廊采用柔性接头与地裂缝正交下的受力与变形特征。胡志平等^[14]通过模型试验对管廊 45° 斜穿地裂缝时上下盘相对错动对管廊的变形规律进行了研究。黄大维等^[15]通过隧道与地层相互作用的模型试验, 对地表超载作用下隧道变形、土压力以及土体沉降进行了监测, 得出了软土地区既有盾构隧道在地表超载作用下极易发生变形超限的结论。徐强等^[16]分析了不同斜交角度对管廊穿越地裂缝的影响。张常光等^[17]建立了均匀与线性两种吸力分布下非饱和土上埋式涵洞的竖向土压力公式, 进行了对比分析, 体现了多种因素对涵顶竖向土压力的综合影响。

目前对于管廊穿越活动地裂缝的研究多是关于整体管廊的变形能力分析, 装配式管廊相较于传统现浇式管廊有较为明显的施工速度快的优势, 但是由于装配式管廊的接头较多, 刚度变化明显, 与土体相互作用机理较为复杂, 目前对于装配式管廊的研究多是关于管廊接口变形能力分析以及橡胶防水性能研究, 且多基于数值模拟手段, 对于在地裂缝多发地区, 地裂缝活动对装配式管廊的变形与破坏形式的分析很少。为了解装配式管廊在活动地裂缝作用下与土体相互作用机理, 本文采用模型试验, 对地裂缝作用下管廊周边竖向土压力进行了监测, 分析不同地裂缝沉降量下管廊与地层的接触应力。

1 室内模型试验设计

1.1 试验原型

西安城市管廊建设无法避免受到地裂缝活动的影响, 地裂缝场地某典型地下管廊工程断面形式为矩形, 截面尺寸为 3300 mm×3500 mm (宽×高), 管廊壁厚 350 mm, 埋深约为 3~4 m。混凝土强度等级为 C40, 抗拉强度设计值为 2.39 MPa, 内置配筋采用 HRB400 钢筋, 配筋率约为 0.8%, 抗拉强度设计值为 340 MPa, 采用三元乙丙橡胶条密封防水。

1.2 相似模型试验系统

管廊多埋深较浅, 采用明挖施工。考虑到施工周期较长, 围挡对城市交通与周边环境影响较大, 城市中通常采用排桩支护, 以减少其作业影响范围, 使得管廊与排桩间距较小, 管廊建设与运维对周围土体影响范围受限, 不同于空旷场地施工。

考虑到排桩支护影响, 设计模型箱净尺寸为 5

m×1.5 m×2.8 m (长×宽×高), 如图 1 所示, 固定模型箱下盘, 西安地裂缝倾角多为 80° 左右, 由于地基处理影响, 管廊周围土体均为重塑土, 因此仅于箱底预设 80° 裂缝。为实现地裂缝导致的不均匀沉降, 上盘底板与上盘端部侧板连接, 上盘在底部电动螺旋千斤顶的作用下沿预设裂缝整体下滑, 同时会沿着端部的滑轨滑动, 滑轨角度为 80°, 装置整体沉降速率为 10 mm/h。模型箱两侧采用透明钢化玻璃板^[18]以便试验进行中清晰观测土体裂缝发展过程, 沉降平台如图 1 所示。

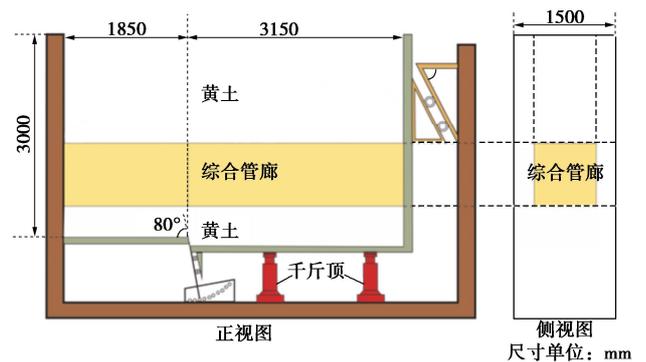


图 1 沉降平台示意图

Fig. 1 Schematic diagram of settlement platform

1.3 模型相似比

试验模型尺寸应按照相似理论推导, 在地裂缝活动作用下, 装配式管廊与土体受力形式复杂, 因此, 相似理论很难完全满足。取管廊几何尺寸和重度为基本相似物理量, 对应的相似常数 C_L 和 C_γ 分别为 3.5 和 1。根据相似理论, 围岩相似常数 C_{E_s} , C_μ , C_c , C_ϕ (分别表示围岩弹性模量、泊松比、黏聚力和内摩擦角) 均为 1。

土体受力与变形参数多为非线性, 难以严格相似。依据夯填试验, 每次填土 150 mm, 夯实至 100 mm, 经实验测得土体密度为 1526 kg/m³, 含水率为 16.7%, 与西安实际地层类似, 基本满足相似条件。混凝土及配筋相似常数如表 1, 其中, E 为混凝土弹性模量, σ 为混凝土应力, ε 为混凝土应变, ν 为配筋率。本次试验管廊采用钢筋混凝土结构, 相似比较难满足, 故设计时适当作如下调整:

$$\left. \begin{aligned} C_E &= 1, \\ C_P &= 3.5, \\ C_\sigma &= C_E C_\varepsilon = 1. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

混凝土强度采用 C40, 选用的相似材料配合比为水泥:中砂:碎石:水:粉煤灰=2.92:6.08:9.17:1.29:1, 经测试, 其抗压强度为 50 MPa, 基本满足相似理论要求。试验原型与模型试验配筋形式见图 2, 均为 HRB400 钢筋, 为满足相似准则, 管廊模型配筋

率需与原型相同, 因此设计管廊模型配筋率为 0.8%。各物理量相似常数如表 1 所示。

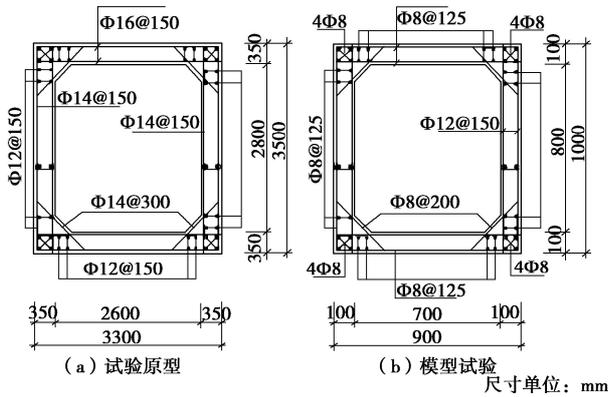


图 2 管廊配筋图

Fig. 2 Reinforcement diagram of utility tunnel

1.4 模型制作及测点布设

(1) 模型制作

管廊模型断面几何尺寸为 900 mm×1000 mm, 壁厚 100 mm, 腋角尺寸为 100 mm×100 mm, 腋角开孔内径 20 mm, 模型单节长度为 800 mm, 施加预应力后各节段间距被压缩至 14~16 mm, 整体模型由 6 段管廊, 5 段间距以及 1 个凸口组成, 总长为 4935 mm。规定管廊编号由下盘至上盘依次为#1~#6, 预设地裂缝穿过第 3 节管廊。为便于对接拼装, 在管廊承插口的工作面上设计有小角度坡面, 在插口工作面上设计梯形橡胶密封圈卡口, 卡槽深 5 mm, 宽 27 mm, 承插口长度 60 mm, 采用三元乙丙梯形橡胶条 (16

mm×22 mm×21 mm) 进行密封。为便于脱模操作, 浇筑管廊采用木制模板, 将配比好的水泥砂浆加入制作好的模具中, 同时振捣均匀, 直至浇筑完成, 在这之后, 混凝土需要进行 28 d 的养护, 使得水泥水化过程更加稳定。管廊制作过程如图 3 所示, 依次为模板及钢筋笼的制作→填料及混凝土养护→第一层土压力盒→第二层土压力盒→预拼装→管廊安装完成→第三层土压力盒→土体填筑完成。

采用 M18 高强螺栓施加预应力, 采用尺寸为 100 mm×100 mm 的三角垫片以消除管廊腋角在后续差异沉降变形过程中产生的过大应力。依据《城市综合管廊工程技术规范》, 橡胶防水的临界接触压力为 1.5 MPa, 为能够适应后续地裂缝活动造成的应力消减, 本文控制防水橡胶条界面压应力为 3 MPa, 计算可得螺杆所需扭力 122 N/m, 采用扭矩扳手施加。

(2) 测点布设

本次试验目的在于监测地裂缝活动对管廊周围土体竖向应力变化影响, 考虑到管廊与地裂缝正交, 管廊与土体的对称性, 如图 4 所示, 管廊底部不同水平位置布设 3 条轴向测线, 分别是管廊轴线、管廊边线以及模型箱侧壁, 管廊顶部与模型箱底部仅在轴线布设一条测线。为了保证测点的合理性与完备性, 每条测线布设 12 个测点, 根据靠近地裂缝测点密而远离地裂缝测点疏的原则布设共计 60 个测点。土压力测点布设如图 4 所示。

表 1 各物理量相似常数

Table 1 Similarity constants of physical parameters

物理量	基本相似常数		非基本相似常数					
	几何尺寸 L	重力加速度 g	位移 x	覆土荷载 p	应力 σ	混凝土 应变 ε	弹性模量 E	钢筋 配筋率 ν
相似性常数	C_L	C_g	$C_x = C_e C_L$	$C_p = C_\sigma$	$C_\sigma = C_e C_\varepsilon$	C_ε	$C_E = C_\nu C_L$	C_ν
目标值	3.5	1	3.5	3.5	3.5	1	3.5	1
采用值	3.5	1	3.5	3.5	1	1	1	1

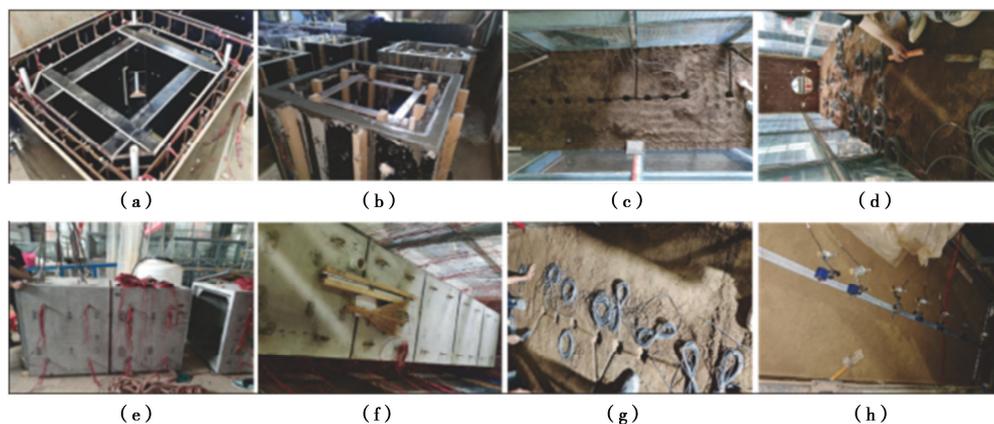


图 3 模型搭建流程

Fig. 3 Building process of test model

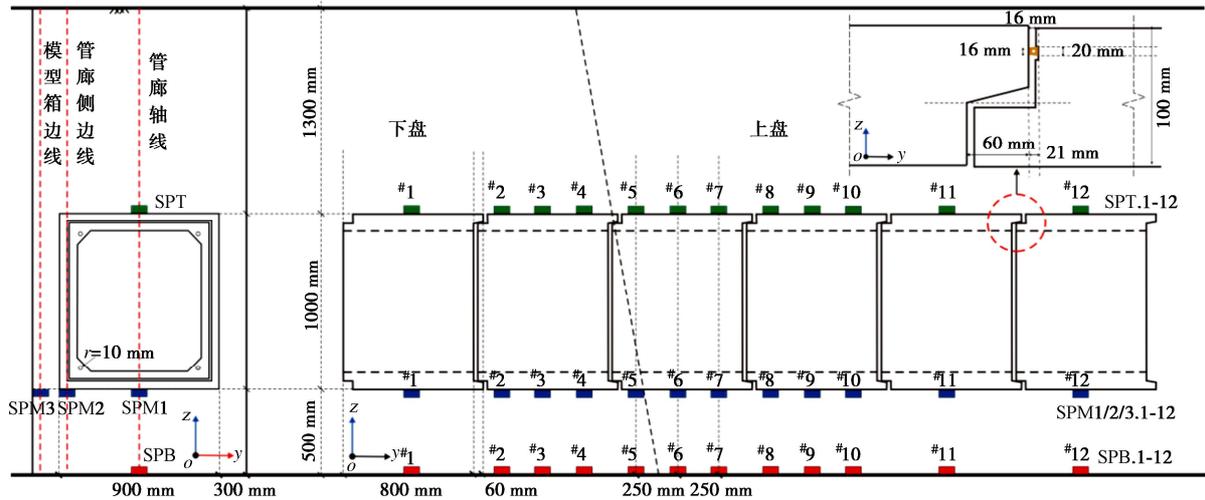


图4 管廊相似模型及测点布设

Fig. 4 Similarity model for utility tunnel and arrangement of measuring points

2 试验结果

2.1 土体裂缝分布规律分析

试验采用分布加载方式，地裂缝活动是一种缓慢的蠕变过程，因此，单次沉降量为10 mm，基于经验和沉降初期数据波动情况确定沉降周期为4 h/次，每次沉降稳定后，记录土体裂缝分布情况及其首次出现所对应的沉降值，并用红色字体标出。土体裂缝分布如图5所示。

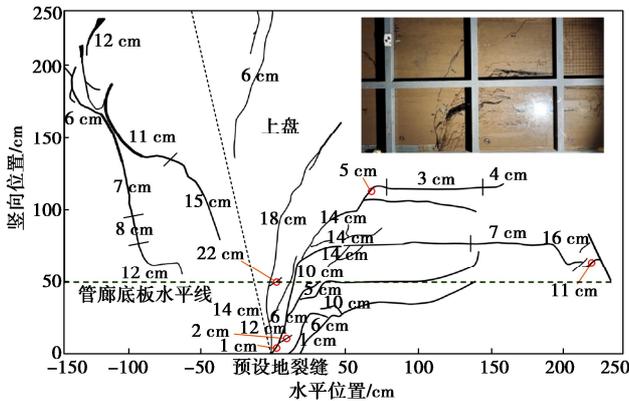


图5 土体裂缝图

Fig. 5 Diagram of crack in soil

由图5可见，在地裂缝活动过程中，地层变形主要集中在管廊底部预设裂缝处，方向反倾，裂缝沿地裂缝反向向上发展，最终沿上盘方向趋于水平。裂缝处土体的受力状态由初期与地裂缝相连处的压剪状态，逐步向上转变为水平裂缝的拉剪状态。

上盘下沉，而管廊下盘不动，导致地裂缝位置处管廊顶部土体受拉，地层顶部的裂缝上宽下窄，方向略与地裂缝反向反倾。下盘土体裂缝产生于上盘沉降量较大后，下盘管廊翘起，使得地层土体受拉开裂。

2.2 模型箱底板土压力增量变化规律分析

地裂缝不同竖向沉降量下模型箱底与地层土体接触应力如图6, 7所示。

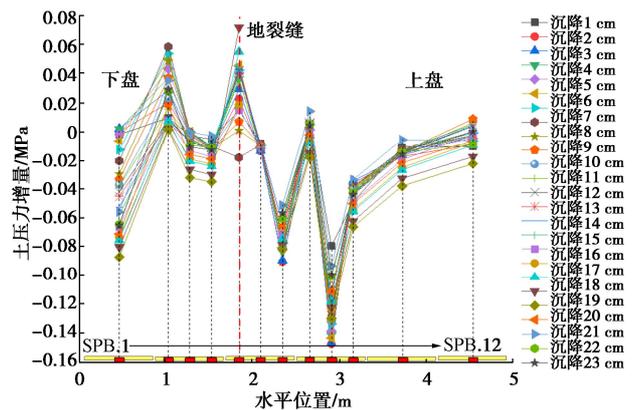


图6 不同水平位置下模型箱底部土压力增量

Fig. 6 Increments of soil pressure at bottom of test box at different longitudinal positions

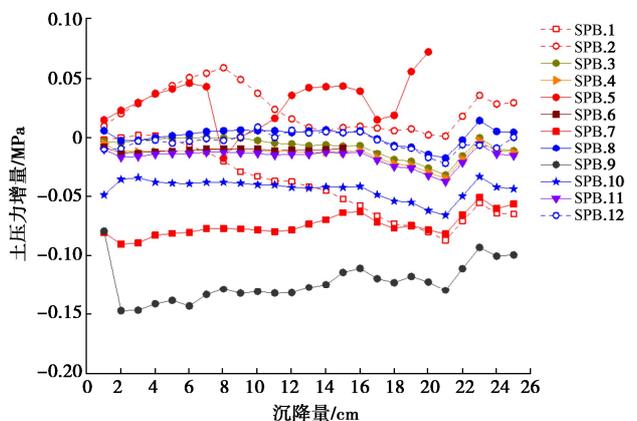


图7 不同沉降量下模型箱底部土压力增量

Fig. 7 Increments of soil pressure at bottom of test box under different settlements

由于土体夯实程度很难保证一致,因此,各位置土压力初值及地裂缝沉降作用响应均将存在一定差异。为消除各测点初始土压力差异对后续土压力的分布规律分析的影响,以土体填筑完成至沉降开始前一段时间内土压力为初始值,提取各测点不同随沉降量变化的土压力增量,后续分析均采用此方法。

由图 6, 7 可见:下盘首节管廊底部的#1 测点接触压力随着沉降量的增大逐步减小,减小幅度为 0.064 MPa,分析其原因认为上盘下沉使得管廊下盘翘起,致使土压力减小;下盘第 2 节管廊底部#2、#3、#4 测点应力变化集中在#2 测点,其土压力增量在沉降 8 cm 时达到最大值 0.059 MPa,随后逐步减小,这印证了管廊在三维空间中的变形并非线性,而是一种以接口转动为主要形式的折线型排列;第 3 节管廊穿越裂缝,#5 测点位于下盘且最靠近地裂缝,因此在地裂缝沉降时土压力增量变化最大,且有两次明显波动。分析其原因,先开始的增大是由于上盘下沉对下盘有向下的剪切作用,后续的两突然降低,减小值分别为 0.055, 0.024 MPa,分别发生在沉降量为 7, 16 cm 时,应分别为土体裂缝贯通至管廊底部导致剪切作用的弱化,与地裂缝处土体垮塌的影响。在沉降量超过 20 cm 后,#5 测点监测数据消失,应是较大的位错变形,扯断了传输线路;#6、#7 测点位于上盘且最靠近地裂缝,由于管廊底部脱空,其应力略有降低且后续较为稳定;第 4、5、6 节管廊底部#9、#10、#11、#12 测点土压力相对初始时刻均有减小,稳定阶段的减小值分别为 0.132, 0.043, 0.014, 0.002 MPa,基本呈现出线性变化的规律。

2.3 管廊底部轴线土压力增量变化规律分析

如图 8, 地裂缝对管廊与底部土层接触压力在轴线处的影响集中在地裂缝附近以及上盘末端。

由图 8, 9 可见,地裂缝附近的#4、#5 以及第 6 节管廊#12 测点处与地层接触土压力显著增大,其中,#4 测点与#5 测点土压力总增量分别为 0.155, 0.148 MPa,#4 测点土压力变化主要集中在沉降前期,占总增量的 77.4%,而#5 测点土压力增量则随着上盘沉降平稳上升。分析其原因,管廊下盘在端部逐渐翘起,而上盘靠近地裂缝处在管廊底部形成脱空区,使得管廊与上覆土层压力,均由下盘地裂缝附近土体与上盘端部土体承担。

第 6 节#12 测点处管廊与地层接触土压力在上盘沉降为 13 cm 时突然显著增大,增大值为总增量的 72%,随后平稳。此时,除#4 测点与#5 测点外,其余测点管廊与地层接触土压力均有较小幅度的降低。分析其原因认为是当上盘沉降达到 13 cm 时,上盘管廊

仅与第 6 节底部土体接触,第 4 节与第 5 节管廊底部与地层全部脱空,此后,随着上盘沉降,管廊底部与地层接触压力变化不大,趋于稳定。

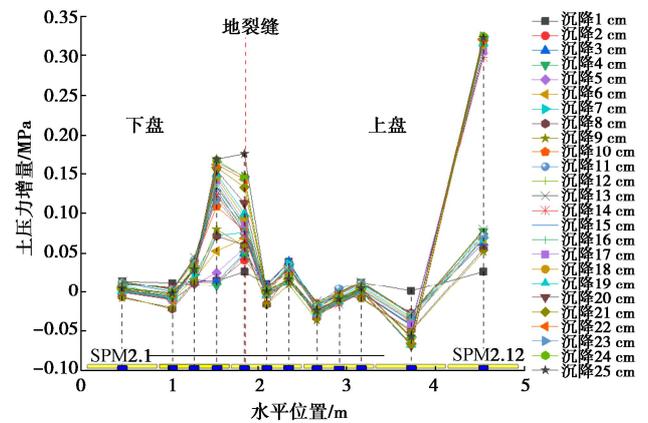


图 8 不同水平位置下管廊底部轴线土压力增量

Fig. 8 Increments of soil pressure at bottom axis of utility tunnel at different longitudinal positions

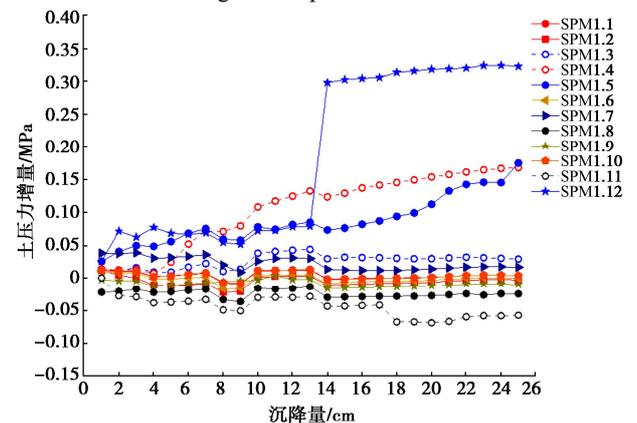


图 9 不同沉降量下管廊底部轴线土压力增量

Fig. 9 Increments of soil pressure at bottom axis of utility tunnel under different settlements

2.4 管廊底部侧线土压力变化规律分析

管廊下表面侧线处与底部土体接触压力对比如图 10, 11 所示,可见地裂缝对管廊与底部土层接触压力在侧线处的影响集中在地裂缝附近。上盘末端处#8 测点、#12 测点压力盒故障,未获得响应数据,不予分析。

由图 10, 11 可见,管廊测点 2 处管廊与地层接触土压力增量先增大至 0.068 MPa,在上盘沉降为 8 cm 时开始减小,沉降为 12 cm 时减小后趋于平稳。分析其原因认为是随着上盘沉降,其底部与地层接触压力增大,同时由于管廊之间柔性接头的变形调节,使得#2 测点处的压力在上盘沉降 8 cm 之前增大,随后较小,直至上盘沉降 12 cm 后与地层脱离并翘起;下盘第 3 节管廊底部的#5 测点处管廊与地层接触压力逐渐增大,并在上盘沉降 23 cm 其增量达到 0.118 MPa,

分析其原因认为是地裂缝活动过程中，下盘管廊逐渐翘起，导致管廊与地层接触压力减小；其余测点管廊与地层接触土压力未发生明显变化。

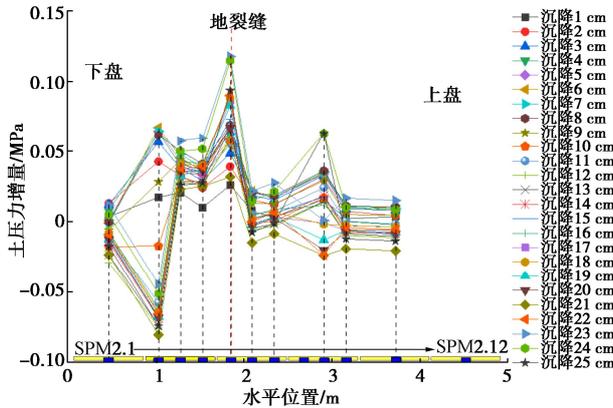


图 10 不同水平位置下管廊底部侧边线土压力增量

Fig. 10 Increments of soil pressure at bottom side line of utility tunnel at different longitudinal positions

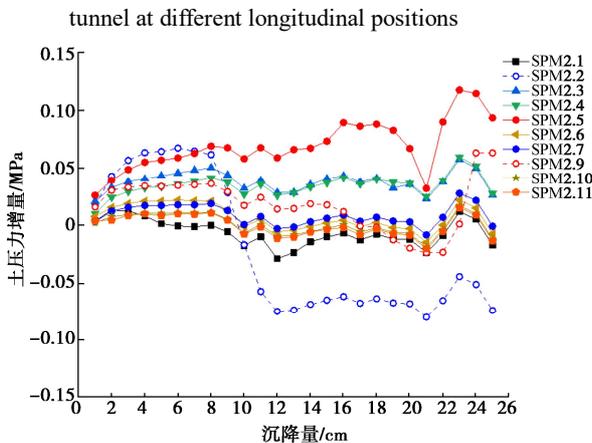


图 11 不同沉降量下管廊底部侧边线土压力增量

Fig. 11 Increments of soil pressure at bottom side line of utility tunnel under different settlements

2.5 管廊底部模型箱边界土压力增量变化规律分析

管廊底部模型箱边界处土压力增量对比如图 12, 13 所示。由于管廊侧壁距离模型箱壁仅有 30 cm, 在管廊吊装后, 其两侧的土体夯实较为困难, 因此, 此处土体夯实程度差异较大。上盘末端处测点#12 压力盒故障, 测点#9 在上盘沉降超过 19 cm 后发生故障, 未获得响应数据, 不予分析。

由图 12, 13 可见, #1 测点与#2 测点处土压力均先增大后减小并趋于稳定, #1 测点在上盘沉降为 5cm 时土压力增量达到最大值 0.0307 MPa, 而当#2 测点土压力增量达到其最大值 0.042 MPa 时, 上盘沉降已达到 7 cm。分析其原因在于随着上盘沉降量的增大, 下盘管廊对底部土体的压力变大, 使得管廊底部两侧土体的压力增大, 随着沉降量继续增大, 下盘管廊翘起, 对两侧土体有向上的接触摩擦力, 使得该范围的土体竖向应力减小, 下盘第 1 节管廊先于第 2 节管廊翘起, 因此#1 测点处土压力先于#2 测点开始降低。#4 测点与

#5 测点处土压力显著增大, 其变化规律与模型箱底部测点规律基本相同。其余各测点土压力变化均不明显。

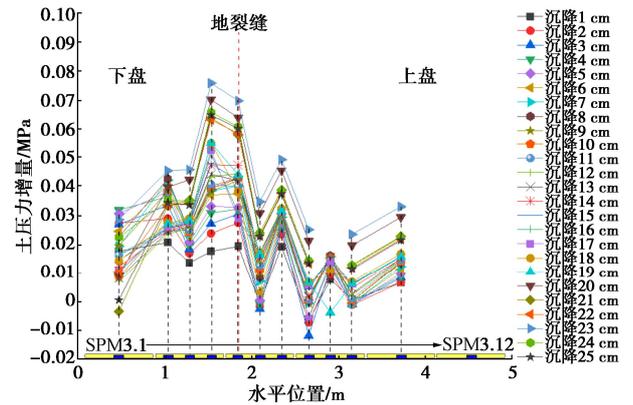


图 12 不同水平位置下管廊底部模型箱侧壁土压力增量

Fig. 12 Increments of soil pressure on side wall of model box at bottom of utility tunnel at different longitudinal positions

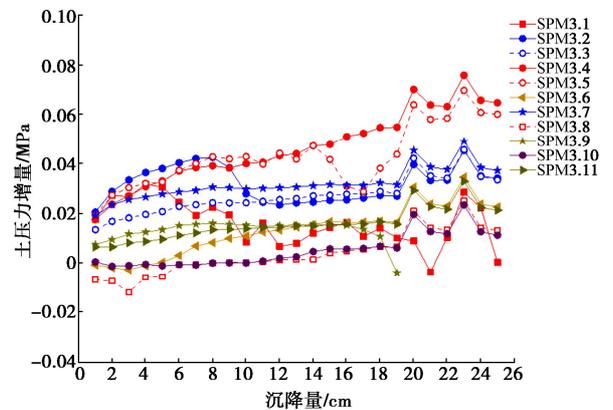


图 13 不同沉降量下管廊底部模型箱侧壁土压力增量

Fig. 13 Increments of soil pressure on side wall of model box at bottom of utility tunnel under different settlements

2.6 管廊顶部轴线土压力增量变化规律分析

管廊顶部轴线处管廊与上覆土体接触压力对比如图 14, 15 所示, 由于上覆土层厚度较小, 且地表无约束, 其应力值变化相对较小, 仅受到地裂缝上盘沉降管廊变形的影响。

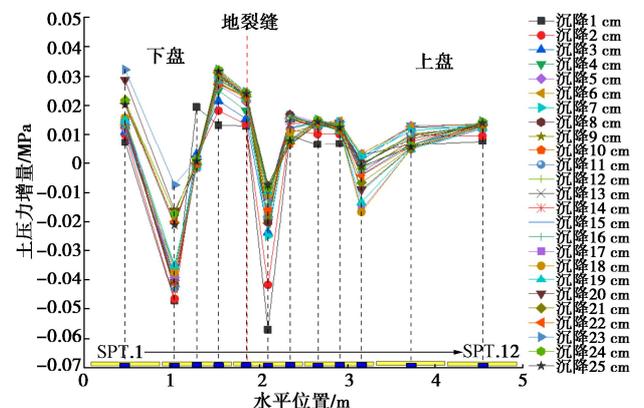


图 14 不同水平位置下管廊顶部轴线土压力增量

Fig. 14 Increments of soil pressure at top axis of utility tunnel at different longitudinal positions

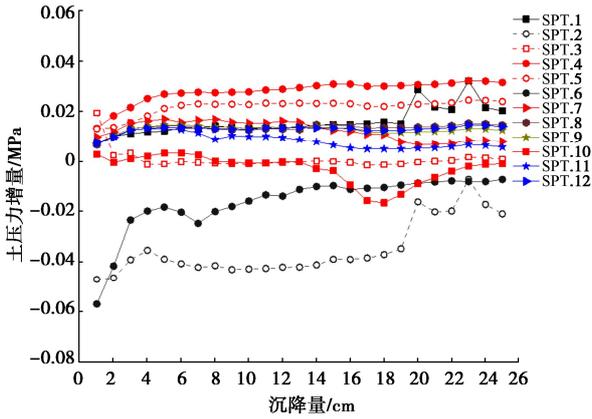


图 15 不同沉降量下管廊顶部轴线土压力增量

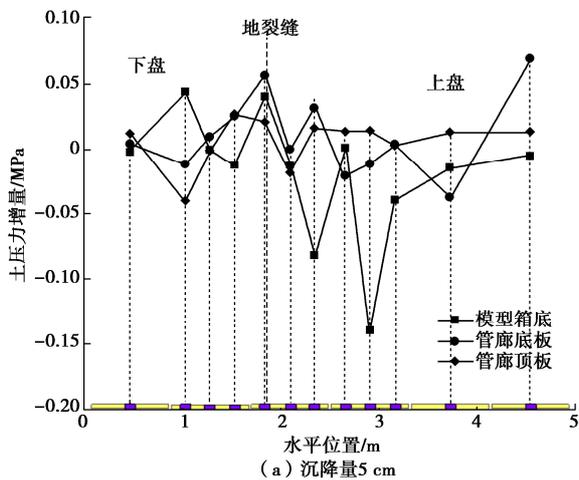
Fig. 15 Increments of soil pressure at the top axis of utility tunnel under different settlements

由图 14, 15 可见, 管廊顶部与土层接触压力除#2 测点与#6 测点外, 其余测点变化均较为平缓。第 2 节管廊顶部#2 测点初期应力由于管廊整体微小沉降造成的土拱效应减小明显, 后期由于管廊翘起而增加; 第 3 节管廊跨越地裂缝, 其顶部#5, #6, #7 测点中, 在上盘沉降时, #6 测点的应力降低幅度最为明显, 在沉降初期其土压力减小就已达到 0.057 MPa, 后续缓慢增大, 分析其原因认为是#6 测点刚好位于顶部土体裂缝处, 土体的不连续导致了应力传递的不连续, 因此应力较小; 后期管廊整体沉降, 致使管廊顶面受力均匀, 其应力有所回升, 其余上盘 3 节管廊应力变化不明显。

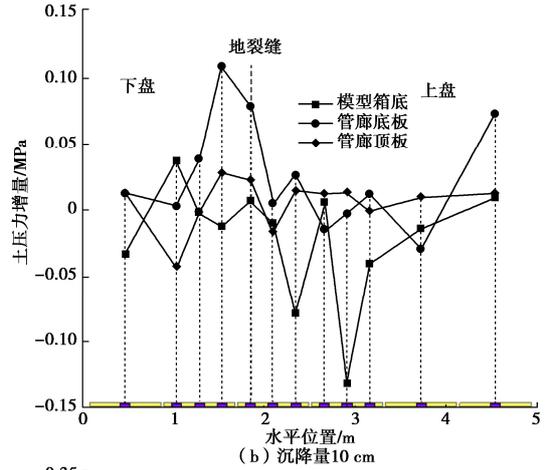
3 受限场地土压力增量分布规律研究

3.1 土压力增量竖向分布规律

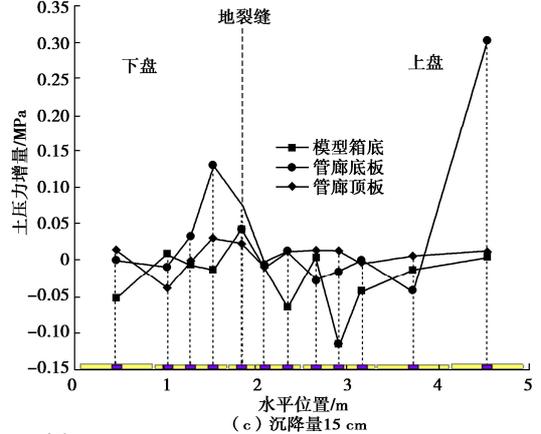
为研究地裂缝活动作用下管廊不均匀沉降变形对周围不同深度处土层影响, 对比模型箱底部轴线、管廊底部轴线以及管廊顶部轴线 3 处竖向土压力增量的分布规律及随沉降量变化的规律, 如图 16 所示。



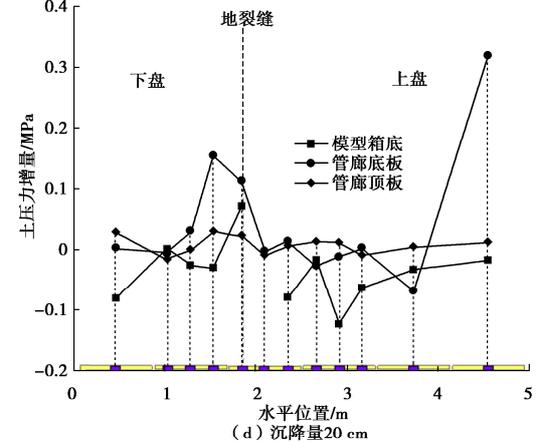
(a) 沉降量 5 cm



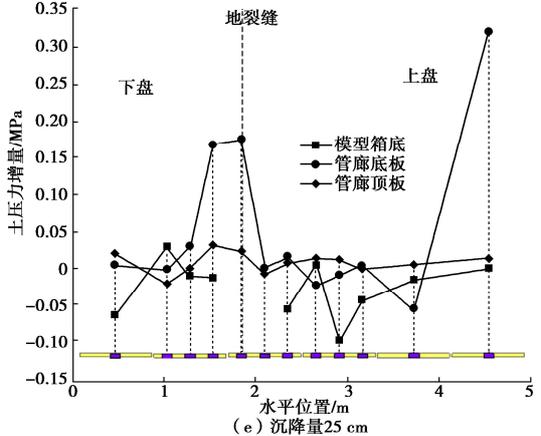
(b) 沉降量 10 cm



(c) 沉降量 15 cm



(d) 沉降量 20 cm



(e) 沉降量 25 cm

图 16 不同竖直位置下土压力增量对比

Fig. 16 Comparison of increments of soil pressure at different vertical positions

由图 16 可见,随着地裂缝上盘沉降量的增大,不同深度处土层竖向压力变化幅度不断增大,其中管廊底板与地层的接触压力变化幅值最大。管廊顶底板与土层的接触压力规律大致相反,尤其表现在上盘第 4 节管廊,由于管廊与底部土体的接触压力通过应力扩散,模型箱底板处的土体竖向压力不均匀分布的程度小于管廊底部。除管廊上盘末端底板处接触压力随着地裂缝沉降不断增大外,管廊上盘不同深度处土体竖向压力变化不大,表明管廊在沉降 5 cm 后,上盘土体的受力状态较为稳定,而土层中应力重新分布主要集中在下盘管廊底部。

3.2 土压力水平向分布规律

为研究管廊底部不同水平位置土压力的变化规律,取管廊底板 3 条测线土体竖向压力变化值进行对比分析。由图 17 可见,3 条侧线土体竖向压力变化的规律类似,以变化最明显的#5 测点为例,在不同的地裂缝活动量下,由内至外 3 条侧线土压力增量的比值分别为 1 : 1 : 0.579, 1 : 0.73 : 0.544, 1 : 0.96 : 0.545, 1 : 0.566 : 0.593, 1 : 0.534 : 0.341。表明地裂缝活动时,管廊变形对周围土体的影响幅度从底板中线向两侧逐渐衰减。

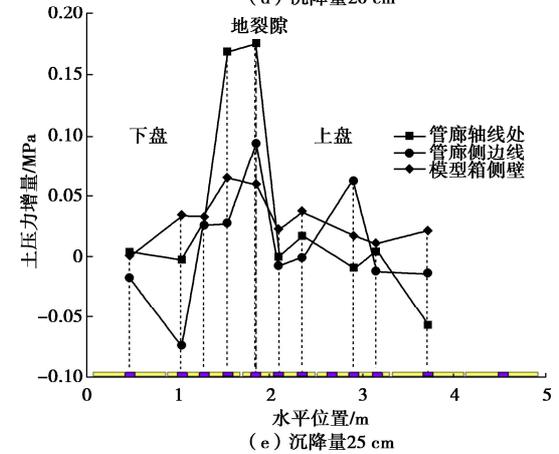
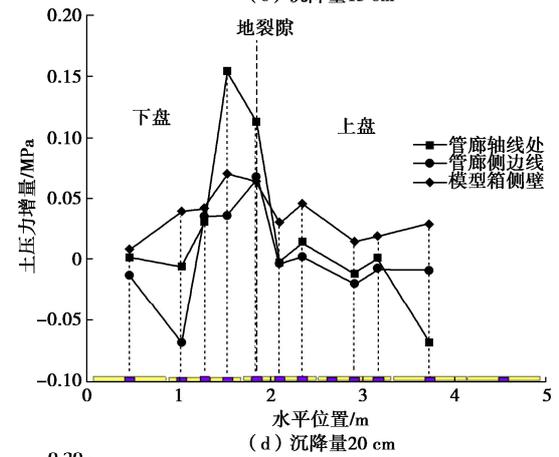
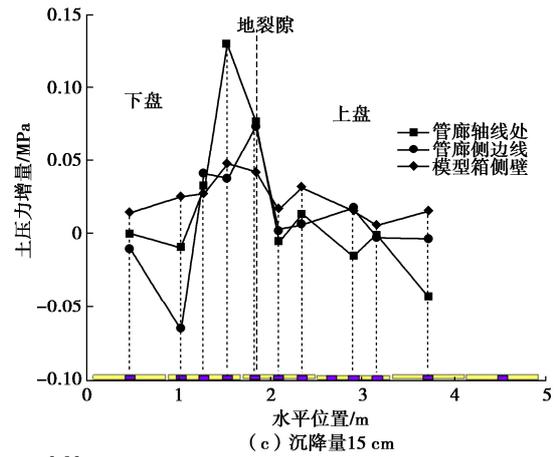
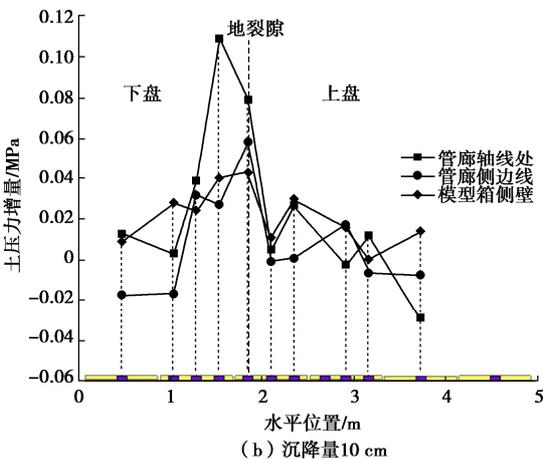
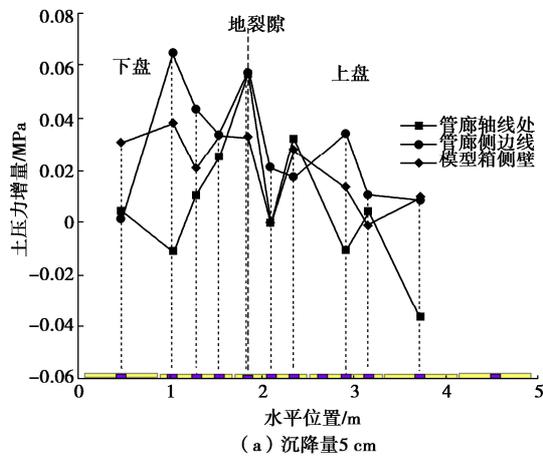


图 17 不同水平位置下土压力增量对比

Fig. 17 Comparison of increments of soil pressure at different horizontal positions

4 结 论

本文采用模型试验对装配式管廊穿越活动地裂缝时其周边土压力变化进行了分析,得到以下 4 点结论。

(1) 在地裂缝活动过程中,土体破裂集中在管廊底部地裂缝处,方向反倾,裂缝沿地裂缝向上发展,最终裂缝方向趋于水平。

(2) 装配式管廊在地裂缝活动的作用下变形是一种下盘管廊非线性与上盘管廊线性的组合变形形

式,且这种变形作用在模型箱底部测点中得到更加明显的体现。

(3) 地裂缝活动引起管廊变形,其对土体竖向应力影响主要集中于地裂缝处与管廊上盘末端。

(4) 地裂缝活动时,管廊变形对周围土体的影响程度从底板中线向两侧逐渐衰减,从管廊底板向顶部逐渐衰减。

参考文献:

- [1] CANTO-PERELLO J, CURIEL-ESPARZA J, CALVO V. Criticality and threat analysis on utility tunnels for planning security policies of utilities in urban underground space[J]. *Expert Systems With Applications*, 2013, **40**(11): 4707-4714.
- [2] CHEN J, JIANG L Z, LI J, et al. Numerical simulation of shaking table test on utility tunnel under non-uniform earthquake excitation[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2012, **30**: 205-216.
- [3] 孙书伟,朱本珍,马宁.城市地下综合管廊开挖方法及设计参数分析[J].*铁道工程学报*, 2019, **36**(3): 61-66. (SUN Shuwei, ZHU Benzhen, MA Ning. Analysis of excavation method and design parameters for underground pipeline utility tunnel[J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2019, **36**(3): 61-66. (in Chinese))
- [4] 易伟建,颜良,彭真.无腋角综合管廊结构足尺模型静载试验与有限元分析[J].*湖南大学学报(自然科学版)*, 2019, **46**(7): 1-10. (YI Weijian, YAN Liang, PENG Zhen. Static load test and finite element analysis on full-scale model of utility tunnel structure without axillary angle[J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2019, **46**(7): 1-10. (in Chinese))
- [5] 冯立,丁选明,王成龙,等.考虑接缝影响的地下综合管廊振动台模型试验[J].*岩土力学*, 2020, **41**(4): 1295-1304. (FENG Li, DING Xuanming, WANG Chenglong, et al. Shaking table model test on seismic responses of utility tunnel with joint[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, **41**(4): 1295-1304. (in Chinese))
- [6] 彭建兵.西安地裂缝灾害[M].北京:科学出版社,2012. (PENG Jianbing. *Ground Fissure Disaster in Xi'an*[M]. Beijing: Science Press, 2012. (in Chinese))
- [7] 卢全中,彭建兵,邓亚虹,等.北京北七家—高丽营地裂缝破坏特征及影响带宽度[J].*工程勘察*, 2014, **42**(6): 5-11. (LU Quanzhong, PENG Jianbing, DENG Yahong, et al. Failure characteristics and influence width of Beiqijia-Gaoliying ground fissure in Beijing[J]. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 2014, **42**(6): 5-11. (in Chinese))
- [8] 卢全中,吴辉龙,彭建兵,等.地裂缝带路基土的压缩特性及防治对策[J].*中国公路学报*, 2015, **28**(7): 10-17. (LU Quanzhong, WU Huilong, PENG Jianbing, et al. Compression characteristic and control measure of subgrade soil in ground fissure zone[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2015, **28**(7): 10-17. (in Chinese))
- [9] 西安地裂缝场地勘察与工程设计规程: DBJ 61-6-2006[S].西安:2006. (Code for Xi'an Ground Fracture Site Investigation and Engineering Design: DBJ 61-6-2006[S]. Xi'an: 2006. (in Chinese))
- [10] 杨招,黄强兵,肖双全,等.地裂缝场地地铁隧道施工CRD工法优化研究[J].*工程地质学报*, 2021, **29**(2): 516-525. (YANG Zhao, HUANG Qiangbing, XIAO Shuangquan, et al. Study on optimization of crd construction method of metro tunnel through the ground fissure site[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2021, **29**(2): 516-525. (in Chinese))
- [11] 许晨,袁立群,门玉明,等.地铁振动作用下穿越地裂缝隧道-地层动力响应模型试验研究[J].*工程地质学报*, 2018, **26**(5): 1360-1365. (XU Chen, YUAN Liqun, MEN Yuming, et al. Dynamic model test for response of tunnel-stratum crossing ground fissure under vibration of metro[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2018, **26**(5): 1360-1365. (in Chinese))
- [12] YAN Y F, HUANG Q B, XIE Y L, et al. Failure analysis of urban open-cut utility tunnel under ground fissures environment in Xi'an, China[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2021, **127**: 105529.
- [13] 闫钰丰,黄强兵,杨学军,等.地下综合管廊穿越地裂缝变形与受力特征研究[J].*工程地质学报*, 2018, **26**(5): 1203-1210. (YAN Yufeng, HUANG Qiangbing, YANG Xuejun, et al. Research on the deformation and force characteristics of underground utility tunnel crossing ground fissure[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2018, **26**(5): 1203-1210. (in Chinese))
- [14] 胡志平,张丹,张亚国,等.地下综合管廊结构斜穿活动地裂缝的变形破坏机制室内模型试验研究[J].*岩石力学与工程学报*, 2019, **38**(12): 2550-2560. (HU Zhiping, ZHANG Dan, ZHANG Yaguo, et al. Test study on deformation and failure mechanisms of utility tunnels obliquely crossing ground fissures[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2019, **38**(12): 2550-2560.

- (in Chinese))
- [15] 黄大维, 周顺华, 冯青松, 等. 地表超载对软、硬地层中既有盾构隧道影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(5): 942-949. (HUANG Dawei, ZHOU Shunhua, FENG Qingsong, et al. Experimental study on influences of surface surcharge on existing shield tunnels buried in soft and hard soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(5): 942-949. (in Chinese))
- [16] 徐强, 白超宇, 李文阳, 等. 地下综合管廊穿越活动地裂缝变形与内力的响应分析[J]. 工程地质学报, 2021, 29(5): 1632-1639. (XU Qiang, BAI Chaoyu, LI Wenyang, et al. Response analysis of deformation and internal force of underground utility tunnel crossing active ground fracture[J]. Journal of Engineering Geology, 2021, 29(5): 1632-1639. (in Chinese))
- [17] 张常光, 吴凯, 李宗辉, 等. 考虑中间主应力的非饱和土上埋式涵洞竖向土压力公式[J]. 建筑科学与工程学报, 2021, 38(6): 177-185. (ZHANG Changguang, WU Kai, LI Zonghui, et al. Formulation of vertical earth pressure against positive buried culvert in unsaturated soils considering intermediate principal stress[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2021, 38(6): 177-185. (in Chinese))
- [18] 赵秋, 陈鹏, 赵煜炜, 等. 台后设置拱形结构的无缝桥梁整体受力性能[J/OL]. 吉林大学学报(工学版):1-10[2023-02-08]. <https://dori.org/10.13229/j.cnki.jdxbgxb20221081>. (ZHAO Qiu, CHEN Peng, ZHAO Yiwei, et al. Overall mechanical performance of seamless bridge with arched structure behind platform[J/OL]. Journal of Jilin University (Engineering edition):1-10[2023-02-08]. <https://dori.org/10.13229/j.cnki.jdxbgxb20221081>. (in Chinese))

国际地下空间大会和第二届地下空间探测大会会议通知

ACUUS 2023-EUUS-2 (国际地下空间大会和第二届地下空间探测大会) 将于 2023 年 11 月 1 日—4 日在新加坡召开。为了能够服务于更多学者, 本次大会将在新加坡设置主会场, 中国(徐州)设置分会场, 通过虚拟平台实现国内外线上线下交流。大会网址为 <https://www.acuus2023.com/>。

本届会议将围绕地下空间研究方向征集论文, 包括地下建筑、地下空间实例研究、资源开发与空间利用等 15 个主题。组委会将遴选优秀论文, 在 *Tunnelling and Underground Space Technology*、*Underground Space Journal* 和 *Deep Underground*

Science and Engineering 组建特刊。投稿链接 <https://www.acuus2023.com/submission-form>。

组委会将举办青年论坛或青年学者全体会议, 组委会将根据科学委员会的建议, 挑选数名青年学者在青年学者全体会议上进行发言并颁发荣誉证书。

摘要提交截止日期 2023 年 3 月 1 日, 摘要提交结果通知 2023 年 5 月 1 日, 全文提交截止日期 2023 年 6 月 15 日, 早鸟注册截止日期 2023 年 9 月 1 日。

(大会组委会 供稿)