

耦合型地裂缝活动特征与成因机制模拟研究

孟振江, 彭建兵, 李超, 乔建伟, 王飞永, 康尘云, 赵俊彦, 张凡

A simulation study of the activity characteristics and genetic mechanism of coupled ground fissures: Exemplified by the Songzhuang ground fissure in Beijing

MENG Zhenjiang, PENG Jianbing, LI Chao, QIAO Jianwei, WANG Feiyong, KANG Chenyun, ZHAO Junyan, and ZHANG Fan

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202210038>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

北京平原区地裂缝受灾体形态特征及影响因素

Characteristics of disaster-affected bodies and influence factors for earth fissure in Beijing Plain

赵龙, 罗勇, 李玉梅, 张有全, 刘贺, 沙特, 孔祥如, 齐鸣欢, 田苗壮, 王新惠 水文地质工程地质. 2019, 46(6): 156-164

活动断层作用下地裂缝开裂机理研究

A study of the cracking mechanism of ground fissures under the action of active faults

邵长庆, 杨强, 李浩, 马学军, 王兵虎, 宋伟, 吕凤兰, 边文英 水文地质工程地质. 2019, 46(4): 34-41

河北平原隆尧地裂缝成因机理与模式研究

A study of the genesis mechanism and model of Longyao ground fissures in Hebei plain

吴玉涛, 杨为民, 周俊杰, 于鸿坤, 李晓乐, 张田田, 万飞鹏 水文地质工程地质. 2020, 47(5): 169-178

穿越地裂缝带地铁隧道结构分段长度优化研究

Optimal length for segmented structure of the metro tunnel obliquely crossing active ground fissure zone

黄强兵, 姜紫看, 邓亚虹, 王立新, 胡士伟 水文地质工程地质. 2019, 46(2): 109-109

扁铲探头贯入干砂的位移特征试验研究

An experimental study of the displacement characteristics of dry sand under dilatometer penetration

陈忠清, 吴天宇, 高彦斌, 吕越, 刘帅 水文地质工程地质. 2021, 48(3): 119-125

桂海碑林摩崖石刻水害成因分析及防治对策

Cause analysis and control measures of water damages in Guihai's stone inscription

刘硕, 白雪亮, 张彬, 张中俭, 孙进忠, 杨文府 水文地质工程地质. 2020, 47(2): 126-133



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202210038

孟振江, 彭建兵, 李超, 等. 耦合型地裂缝活动特征与成因机制模拟研究——以北京宋庄地裂缝为例 [J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(3): 138-148.

MENG Zhenjiang, PENG Jianbing, LI Chao, *et al.* A simulation study of the activity characteristics and genetic mechanism of coupled ground fissures: Exemplified by the Songzhuang ground fissure in Beijing[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(3): 138-148.

耦合型地裂缝活动特征与成因机制模拟研究

——以北京宋庄地裂缝为例

孟振江^{1,2,3}, 彭建兵^{1,2}, 李超¹, 乔建伟⁴, 王飞永⁵, 康尘云⁶, 赵俊彦¹, 张凡¹

(1. 长安大学地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054; 2. 西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710054; 3. 长安大学基建处, 陕西 西安 710018; 4. 机械工业勘察设计研究院有限公司, 陕西 西安 710043; 5. 中国地质大学(北京)工程技术学院, 北京 100083; 6. 陕西铁道工程勘察有限公司, 陕西 西安 710043)

摘要: 以北京通州区宋庄地裂缝为原型, 研究以断裂活动和抽水为主要诱因的耦合型地裂缝的发育活动特征和成因机制, 揭示了不同位错量和水位下降量引发的地层位移场和应力场的变化特征。通过实地踏勘, 阐明了地裂缝造成的地表平面及地层剖面的破坏现象; 运用有限差分法模拟研究了断层错动和抽水 2 种工况下的模型地层的变化响应过程, 最后讨论了该类型地裂缝与各诱因之间的关系。结果表明: (1) 该类型地裂缝具有三维活动等特征, 一般造成浅表地层及墙体的水平张开量为 0.3 ~ 1.2 cm, 深部地层的垂直位错量随埋深而逐渐增大; (2) 断裂活动引起的应力变化在裂缝发育区集中, 并造成上盘地层出现明显的竖向位移, 裂缝区地层出现较大的剪切牵引变形, 且其两侧的竖向位移差异量最大; 断层位错量的增加造成隐伏裂缝向上逐渐延伸扩展, 并在上盘浅表层引发次级裂缝, 致使地裂缝整体呈具有一定宽度的带状展布; (3) 地下水位下降对地裂缝的竖向延伸和水平扩张均有加剧作用, 裂缝两侧地表产生持续的沉降响应, 并导致沉降漏斗中心成为地裂缝集中发育区, 且该处的模型地层沉降量也最大, 为 10.2 cm, 上盘地层的沉降范围宽度约 38 m, 下盘约 16 m; (4) 该类型地裂缝受断裂控制明显, 但现阶段活动加剧主要为超采地下水所致。研究将对深入理解地裂缝成因机理、建立地层响应和断裂位错与地下水变化的定量联系, 以及防灾减灾具有重要理论意义和实际应用价值。

关键词: 地裂缝; 断裂; 地下水; 位移; 应力; 成因机制

中图分类号: P642.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2023)03-0138-11

A simulation study of the activity characteristics and genetic mechanism of coupled ground fissures: Exemplified by the Songzhuang ground fissure in Beijing

MENG Zhenjiang^{1,2,3}, PENG Jianbing^{1,2}, LI Chao¹, QIAO Jianwei⁴, WANG Feiyong⁵, KANG Chenyun⁶, ZHAO Junyan¹, ZHANG Fan¹

(1. College of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China;

2. Key Laboratory of Western Mineral Resources and Geological Engineering, Ministry of Education, Xi'an,

收稿日期: 2022-10-07; 修订日期: 2023-01-05

投稿网址: www.swdzgcdz.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(41807234; 42207202); 长江水利委员会长江科学院开放研究项目(CKWV2021873/KY); 长安大学中央高校基本科研业务费专项资金项目(300102262909)

第一作者: 孟振江(1984-), 男, 博士, 高级工程师, 硕士生导师, 主要从事工程地质与地质灾害方面的研究。E-mail: mengzj@chd.edu.cn

- Shaanxi 710054, China; 3. Infrastructure Division, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710018, China;*
4. Mechanical Industry Survey and Design Research Institute Co. Ltd., Xi'an, Shaanxi 710043, China;
5. School of Engineering and Technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China;
6. Shaanxi Railway Engineering Survey Co. Ltd., Xi'an, Shaanxi 710043, China)

Abstract: The active characteristics and genetic mechanism of coupled ground fissures mainly induced by fault activities and pumping are studied, and the Songzhuang Town in Tongzhou District of Beijing is taken as the research archetype. The damage of surface planes and stratigraphic profiles caused by ground fissure activities are clarified through field investigation, and the variation characteristics of the displacement field and stress field of the strata caused by different dislocation amounts and groundwater level drop are revealed. The response processes of the model stratum under the two conditions of fault misalignment and groundwater extraction are simulated and studied respectively by using the finite difference method. Finally, the relationship between this type of ground fissure and the main inducing factors is discussed. The results show that (1) the ground fissure is characterized by three-dimensional activities, which causes the vertical tension of the shallow stratum and wall to be 0.3–1.2 cm, and the vertical dislocation of the deep stratum gradually increases with the burial depth. (2) Stress changes caused by fracture activities are concentrated in the ground fissure development area and lead to significant vertical displacements in the hanging wall, the stratum located in the ground fissure area has large shear and traction deformation, and the vertical displacement difference between the two sides is the largest. The gradual increase of fault dislocations causes the hidden fractures to extend upward, and cause secondary cracks on the shallow surface of the hanging wall, resulting in the overall distribution of ground fissures with a certain width. (3) The vertical extension and horizontal expansion of ground fissures are aggravated by the lowering of groundwater levels, and the surface on both sides of the crack produces continuous settlement response, making the center of the subsidence funnel become a concentrated development area of ground fissures, with the maximum settlement of 10.2 cm in the model stratum at the fissure in its central area, and the settlement range of about 38 m in the hanging wall and about 16 m in the foot wall. (4) This type of ground fissures is obviously controlled by faults, but the increased activity in this period is mainly due to groundwater over-exploitation. This work will be of great theoretical and practical significance to understand ground fissure mechanism, establish quantitative relationship between formation and fault with groundwater, and prevent and reduce disasters.

Keywords: ground fissure; fault; groundwater; displacement; stress; genetic mechanism

地裂缝是一种对人居安全和城乡规划建设有很大破坏性和威胁性的缓变型地质灾害,一般认为是由地球内外地质营力和人类活动共同作用产生。地裂缝的成因较为复杂,诱发因素有很多种,如断裂构造与地震、超采地下水与地面沉降、暴雨冲刷与坡面径流侵蚀,以及古河道等都引发地裂缝。中国、美国、墨西哥以及非洲等许多国家都发生了多种不同成因类型的地裂缝灾害,均造成了重大的经济损失,尤其进入 20 世纪后,地裂缝灾害愈演愈烈^[1-4]。近年来,构造型、抽水型和耦合型的地裂缝成因观点相对较为集中。贾润幸等^[5]认为在山西清徐-太谷地区,山前地裂缝主要与活动断层有关,而盆地中部地裂缝主

要与地下水过度开采有关;汪丽等^[6]通过开展原位现场浸水试验,得出水压作用可引起隐伏裂缝的扩展,并分析了地表水诱发黄土隐伏裂缝的机理。而其中地裂缝的耦合成因则越来越被人们广泛认可:谭鹏等^[7]认为裂谷拉张和火山活动是肯尼亚裂谷区地裂缝形成的控制因素;乔建伟^[8]认为渭北台塬地裂缝属多种灾变作用力协同耦合的地裂缝成因模式,其中耦合型地裂缝的典型代表有中国西安地裂缝、北京地裂缝^[9-11]。

北京地质条件复杂,断裂交错发育,工程活动频繁,加上开采地下水引起的地面沉降不断加剧,形成了多处地裂缝集中发育区,尤其是近年来在通州区宋

庄镇出现的地裂缝活动程度较强烈,其发育特征也尤为典型,导致周边建筑及交通基础设施遭到严重破坏,引起了广泛关注^[12-14]。专家学者对其成因也众说纷纭:刘德成等^[15]认为通州区出现的地裂缝主要受地貌形态控制,顺潮白河河堤发育并沿河流两岸分布,属于非构造性地裂缝;刘方翠等^[16]认为通州区宋庄地裂缝主要是砂土液化喷砂冒水引起的地面塌陷裂缝;赵龙等^[17-18]认为该地裂缝活动主要表现为水平拉张,为基底伸展变形、隐伏断裂及超采地下水影响所致。除了现场勘察分析外,很多学者还利用数值模拟方法来研究地裂缝的成因和活动特征,如 Hernandez 等^[19]利用数值模拟分析了抽水导致地裂缝的产生和传播现象;Loukidis 等^[20]较早利用 FLAC 软件模拟研究了上覆土层在隐伏地裂缝作用下的破裂特征;Anastaspoulos 等^[21]通过弹塑性有限元计算分析了正断层作用下上覆砂层的破裂扩展行为,发现砂层中出现的裂缝倾角由下至上逐渐增大;王海刚等^[22]采用 FLAC3D 软件模拟了北京高丽营地裂缝的发展趋势,认为地下水变化作用下地裂缝周围的地层会产生差异沉降;王启耀等^[23]结合弱面破坏和滑移控制理论,研究了先存断裂在地下水抽取过程中对地裂缝的活化和加剧发育机制。然而,目前围绕北京宋庄地裂缝的研究主要集中在灾情分布调查和宏观评价等方面,而针对其平面活动和剖面结构特征的系统研究相对较少,且对于该地裂缝与主要诱发因素之间的关系也没有开展专门的深入研究,尤其在从断裂活动和水动力诱发耦合的角度分析其成因和扩展机制方面还涉及较少。此外,以往利用数值模拟方法研究地裂缝的活动大多是在模拟隐伏断裂对上下盘地层的影响方面,且模拟的工况较单一,而基于不同的断裂错动量和地下水水位下降量诱发地层位移场、应力场等相关变化来解析成因机制的模拟研究则鲜有涉及。

基于此,围绕耦合型地裂缝的研究薄弱区域,解析断裂活动和抽水耦合作用诱发的典型地裂缝的活动规律,详细揭示地裂缝的地表平面展布及剖面结构破坏特征;通过数值模拟手段,建立三维地质模型,重点揭示断裂活动和地下水位变化引起地层的位移和内部应力等变化特征,最后分析该类型地裂缝的耦合成因机制,以期地为地裂缝的防灾减灾、城乡规划建设 and 地下水开采等提供一定的科学依据。

1 研究区地质环境概况

北京通州区地处华北平原西北边缘地带,在永定

河和温榆河的冲洪积平原上,地势由西北向东南倾斜,气候类型为暖温带半湿润、半干旱大陆性季风气候,主要地貌类型有冲积平原、河流阶地及河漫滩等。区内第四系松散沉积层广泛分布,一般为砂与黏性土互层,基岩底凹凸不平,沉积层厚度差异较大,且由东向西逐渐减小。通州区内有以潮白河、温榆河和北运河为主的多条河流,河流以西北—东南走向为主,属海河流域。区内地下水流向与地势下降方向相近。一般把通州区地下水分为4个含水层,第一、第二含水层为浅表含水层,岩性以细砂为主,夹杂有中粗砂和少量砾石;第三、第四含水层为深层含水层,岩性以粗砂和砂砾石为主。浅层地下水的补给来源主要为大气降水,深层地下水一般靠侧向径流和浅层水的越流补给,地下水排泄方式主要为自然蒸发和工农用水抽取。

在地质构造特征方面,自中生代末期以来,北京平原区形成了一系列以 NE 向及 NW 向为主的断裂构造,而 NE、NNE 向断裂对区域的稳定性起着主要控制作用,其中南苑—通县断裂是通州区内重要的控制性断裂,是划分北京迭凹陷和大兴迭隆起的分界断裂,控制了通州地区新生代等地层的分布,断裂北西侧第四系地层厚度与可压缩层厚度均大于南东侧。该断裂南起河北省涿州市,沿 NE 走向经刁窝、陈家房、南苑、通州,延伸至顺义区东南部的北务、南庄头附近,延伸总长约 110 km,整体走向 NE35°~50°,倾向 NW,倾角 60°~75°,NW 盘下降,SE 盘相对上升,为高角度正断层;历史地震资料表明,该断裂的活动性具有分段特征,每段断裂均具有独特的活动历史和相对独立稳定的活动习性,进入第四纪以来,该断裂西南段断层两侧的基底高度相对差异不大,反映该段构造活动微弱,而宋庄所处的北东段断裂显示出的构造运动特征明显,活动性较强^[12-16](图 1)。

2 地裂缝发育及活动特征

通州区地裂缝始现于 1966 年冬季,在通州农业印刷厂最先出露,之后在西集镇上坡村、次渠镇麦庄村等地也陆续发现裂缝灾害;1976 年唐山大地震后,位于通州区北部的宋庄镇、郎府乡等地出现了相对规模较大、延伸性较好的地裂缝,尤其自 2010 年以来,宋庄地裂缝扩展迅速,活动较为剧烈,破坏程度也逐渐加重。

2.1 地裂缝地表发育及活动特征

野外实地调查发现,通州宋庄地裂缝西南自小中河起,经双埠头村、沟渠村、大庞村至平家疃村后,继

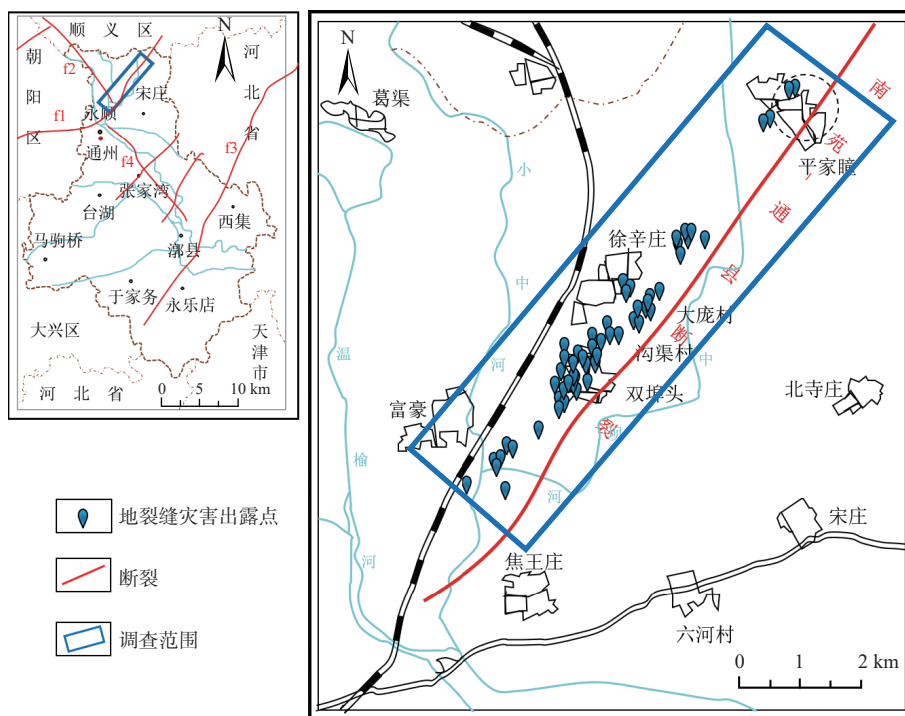


图1 北京主要断裂与宋庄地裂缝分布示意图

Fig. 1 Distribution of faults and the Songzhuang ground fissure in Beijing

续沿北东向延伸, 其中双埠头村出现的地裂缝活动程度较强。裂缝延伸总长度 8.7 km, 整体走向 NE 31°, 近平行于南苑—通县断裂, 倾向 NW, NW 盘相对下降, 地裂缝活动引起的灾害出露点在走向上具有很好的一致性, 总体近直线延伸、呈带状分布, 影响带宽度一般为 20 ~ 160 m(图 1)。

沿线多处地表开裂、民房受损, 地裂缝造成墙体的开裂宽度一般为 0.3 ~ 1.2 cm, 最大水平张开量达 25 cm, 墙体最大开裂速率达 4 cm/a, 现场监测数据表明该地裂缝的平均横向拉张速率为 0.8 cm/a。如双埠头村某民地板破坏, 裂缝西北侧下降, 位错量约 2 cm, 见图 2(a), 镜向 270°; 大庞村某墙体开裂, 张开量约 0.5 cm, 裂缝西侧有下降趋势, 见图 2(b), 镜向 160°。地裂缝在地表一般表现为串珠状线性分布的塌陷坑、陡坎或拉张裂缝, 陷坑最大直径达 0.8 m, 陡坎高差最大达 20 cm, 见图 2(c)及图 2(d), 镜向 70°。地裂缝造成的地表和房屋的破坏形式主要以横向拉张为主, 兼有垂直错动和水平扭动, 总体具有三维活动性、群集性、延伸定向性、分段差异性、致灾不可抗拒性等特点。

2.2 地裂缝剖面结构及破坏特征

据相关深孔钻探和浅层地震资料, 南苑—通县断裂西北侧的第四系地层沉积厚度整体大于东南侧, 为

该地裂缝的形成提供了重要的地质基础条件; 位于地下埋深 45 m 处地裂缝两侧的地层开始出现位错现象; 在埋深 53.2 m 处浅黑灰色砂质黏土层的钻孔岩芯中发现了不连续构造面, 且两侧土样的颜色也不同; 埋深 77 m 处的细砂层也明显被错断, 依靠测年及剪切波速数据识别出晚更新世时期存在地层错动, 垂直落差为 12 m^[18, 24], 可见, 断距随地层埋深的增大而逐渐增大, 也验证了该地裂缝明显的构造属性。

双埠头村探槽揭示了宋庄地裂缝的浅表剖面结构特征, 其长度方向垂直于地裂缝走向。探槽剖面显示地裂缝由探槽底部延伸至地表, 贯穿了探槽侧壁, 裂缝上宽下窄, 平均水平张开量为 1 cm, 最大张开量达 15 cm; 地裂缝在剖面上呈近竖直发育, 土层破坏主要表现为以拉张开裂为主, 裂缝两侧地层产状近水平, 未发现明显的竖向位错现象, 该浅表层地裂缝的水平拉张现象符合由抽水造成地面沉降所引发地裂缝的发育特征(图 3)。可见, 宋庄地裂缝在发育过程中受到了地震、下伏断裂活动及地下水动力等多种因素影响所致, 属于典型的耦合成因型地裂缝。

3 数值模拟设计

为进一步研究分析耦合型地裂缝的影响因素及裂缝的发育过程, 运用有限元 FLAC3D 软件分别模拟



图 2 地裂缝造成的墙体和地表破坏现象

Fig. 2 Wall and ground damages caused by ground fissures



图 3 探槽揭示的地裂缝局部拉张现象

Fig. 3 Partial tension of ground fissures revealed by trench exploration

断裂活动和抽水作用诱发地裂缝扩展及地层的形变过程,揭示模型地层的位移场、内部应力场等变化特征,深入解析各诱发因素对地裂缝的影响作用。需要说明的是,1976年唐山地震引起宋庄地裂缝在地表出现反应,并产生了“喷砂冒水”的砂土液化现象,但进

入 20 世纪以来,北京城区未发生过 5 级以上的地震,与现阶段地裂缝的超常活动关系不明显,因此本次模拟暂未考虑地震因素。

3.1 模型建立与参数设置

以北京宋庄地裂缝为研究原型,建立三维地质结构模型,模型尺寸设置为长×宽×深=100 m×50 m×50 m,预设隐伏断裂倾角设为 75°。结合野外实际情况,地层结构简化设置,上盘地层厚度由上至下依次为 6, 12, 8, 8, 12, 4 m, 下盘依次为 6, 11.6, 7.6, 7.8, 11, 6 m, 计算模型如图 4 所示。模型相关参数设置参考实际地层的物理力学参数,其中断裂带接触面的法向刚度设为 1.0×10^8 Pa,切向刚度为 1.0×10^7 Pa,黏聚力为 0,内摩擦角为 10°,具体见表 1。数值计算时,假设各岩土体为各向同性的均质材料,土体采用理想弹塑性模型,服从摩尔-库伦强度准则;断裂带设为完全破碎,颗粒之间无黏聚力与抗拉强度;初始水位设置在粉土的下界面(埋深 6 m 处),岩土体在水位之下默认为饱和,为了模拟地下水位下降,将基岩的渗透系数和饱和度设为 1。

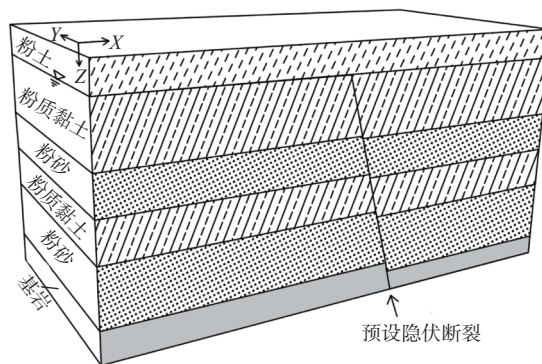


图 4 数值计算模型

Fig. 4 Numerical calculation model

表 1 模型地层计算参数

Table 1 Calculation parameters of the model stratum

序号	模型 地层	重度 /($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量 /MPa	泊松比	黏聚力 /kPa	内摩擦角 /(°)	渗透系数 /($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
1	粉土	17.0	4.0	0.28	10	15	1.0×10^{-9}
2	粉质黏土	17.5	8.5	0.35	40	20	1.0×10^{-11}
3	粉砂	18.0	9.0	0.30	0	30	1.0×10^{-7}
4	粉质黏土	18.5	10.5	0.33	50	15	5.0×10^{-12}
5	粉砂	19.5	12	0.30	0	30	5.0×10^{-8}
6	基岩	25.0	10 000	0.25	2000	40	1

3.2 工况设计及边界条件

工况①:模拟断裂活动诱发裂缝。令计算模型左右两端和前后两侧分别施加 X 和 Y 方向的水平位移约束,模型底部施加 3 个方向的位移约束。因原型断

层为正断层, 令下盘的模型地层底部固定, 而上盘底部可自由活动, 通过控制上盘地层下降来模拟断裂错动, 令上盘基岩依次向下错动 10, 20, 30, 40 cm, 采用稳定渗流下的有效应力分析。计算通过 FLAC3D 有限差分软件中的 interface 接触单元来模拟断裂上下盘之间的相对错动, 暂不考虑断裂带宽度, 接触面为透水边界。

工况②: 模拟抽水作用诱发裂缝。在其他边界条件保持不变的情况下, 通过控制地下水水位下降来模拟抽水过程, 令水位依次下降 5, 15, 25, 35 m, 采用流体扰动平衡法。因考虑到模拟地下水位下降时要分析土体的竖向位移, 故将模型上覆土体均设置为各向同性渗流, 流体模量设为 2.0×10^3 Pa, 流体密度设为 1.0×10^3 kg/m³。为使模拟更加真实, 允许土体在运算过程中产生负的孔隙水压力, 将流体的抗拉强度设为 $-e^{10}$ Pa^[25-28]。

4 结果分析

4.1 断裂活动模拟结果分析

4.1.1 位移场变化

图 5 为断裂活动不同位错量下的模型竖向位移云图, 可以看出, 断裂活动造成地裂缝上盘土体出现较大的竖向位移, 模型地层整体形变响应也较明显; 通过提取模型顶部地层的竖向位移变化量得知, 靠近地裂缝两侧的地表竖向位移差异最大, 模型表面土体出现了较大的剪切变形, 隐伏地裂缝进而向上不断延伸扩展; 错动量越大, 断层上盘地层的响应越强烈, 地裂缝两侧的地层竖向位移差异量越大, 在上下盘地层交汇区域的变化响应范围也越来越深; 在断裂影响范围内, 距离地裂缝越远处的上盘地表沉降量越大, 并逐渐在浅表层引发次级裂缝, 造成地裂缝呈具有一定宽度的带状呈现, 该现象与野外地裂缝发育现场一致。

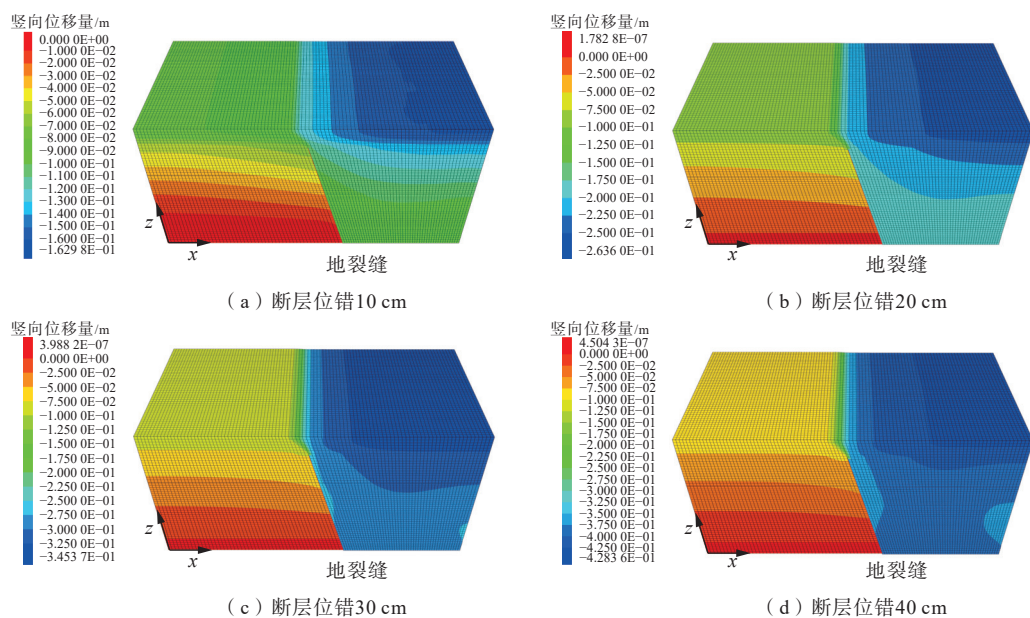


图 5 断层位错引起的模型地层竖向位移变化云图

Fig. 5 Vertical displacement contour of the model stratum caused by fault dislocations

4.1.2 应力场变化

从竖向应力变化云图可以看出(图 6), 随着断层错动量逐渐增加, 模型应力场不断重新分布, 位于裂缝两侧附近的地层为应力集中区; 地表土体应力变化存在差异性, 竖向应力整体表现为陡坎型变化, 地裂缝上盘地层的竖向应力降低, 表现为拉张区, 下盘竖向应力增高, 表现为挤压区, 且拉张区范围大于挤压区, 断裂活动对上盘的影响大于下盘, 且次级裂缝多出现于上盘地层。

4.2 抽水模拟结果分析

4.2.1 位移场变化

抽水活动引起的模型地层竖向位移变化见图 7。可以看出, 当地下水水位下降 5 m 时, 地表形成以地裂缝为中心的集中沉降区, 并且上盘地表的沉降范围大于下盘; 分析地表竖向位移变化得到, 上盘地表沉降范围宽度约为 40 m, 下盘沉降范围宽度约为 25 m, 其中地裂缝处沉降最大, 垂直沉降量约为 9.2 cm, 表明地下水下降初期, 两侧地表均产生沉降响应, 并且沉

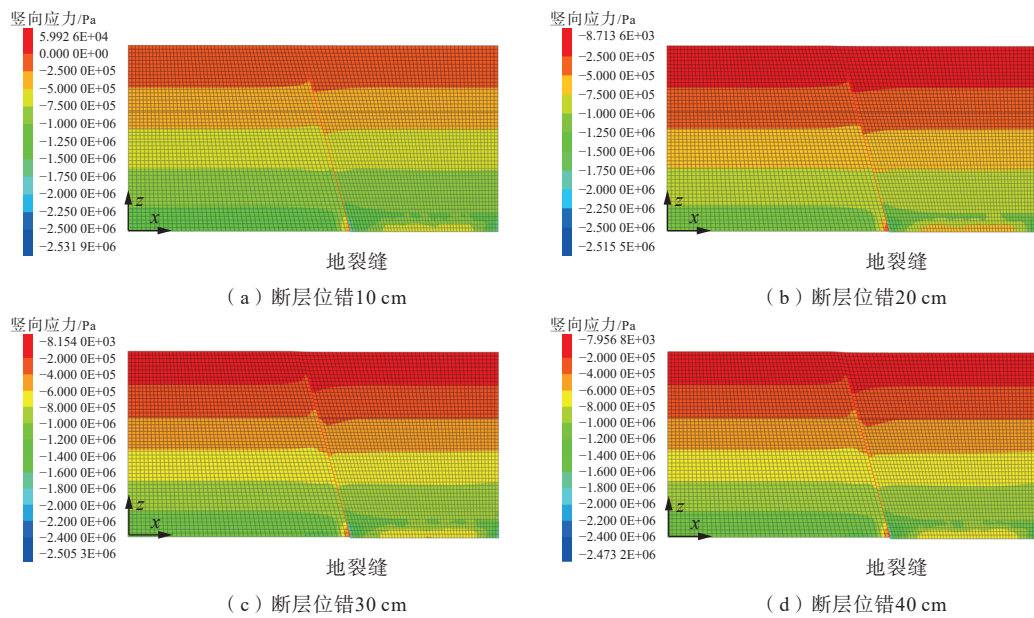


图 6 断裂活动造成的地层竖向应力变化云图

Fig. 6 Vertical stress contour of the model stratum caused by fault dislocations

降速度较快(图 8);当水位继续下降 15, 25, 35 m 时,地表继续沉降,但是沉降速率变慢,主要表现为水平拉张,且范围也不断增大;在断裂处的地表土体的沉降量均最大,表明地下水水位的下降对于主裂缝的垂

向扩展具有持续的促进和加剧作用。通过对地表横向和纵向的位移变化分析可见,在地下水位下降情况下,地下水的下降对主裂缝的延伸和生长具有重要的影响,主要表现为地裂缝附近地层的拉张和不均匀沉降。

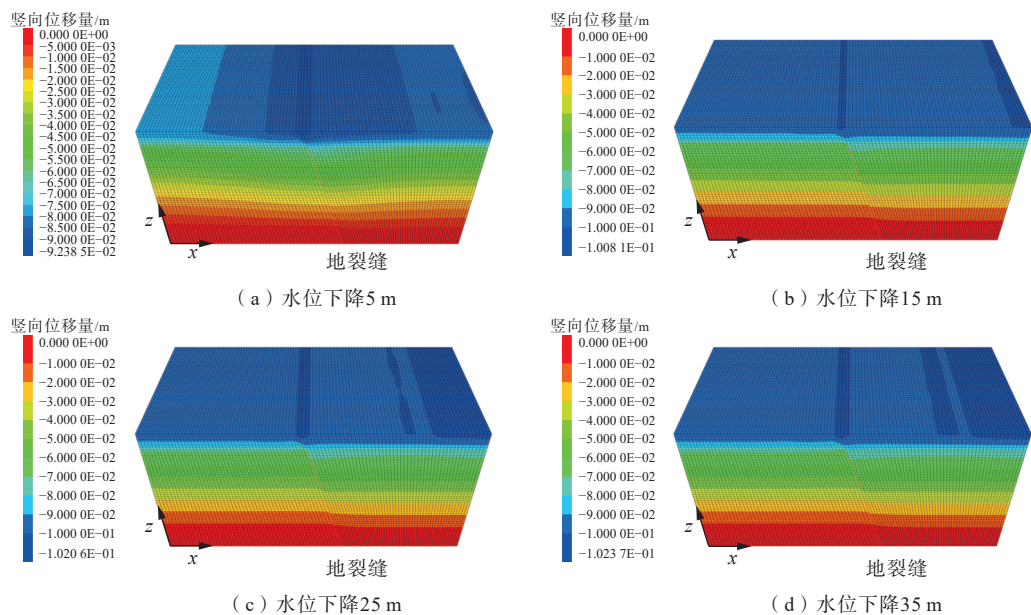


图 7 抽水活动引起的模型地层竖向位移变化云图

Fig. 7 Vertical displacement contour of the model stratum caused by groundwater extraction

4.2.2 应力场变化

分析地下水位下降引起模型地层的竖向应力变化发现,当水位下降时,裂缝附近两侧土层的竖向应力均出现陡坎型变化,在裂缝处形成应力集中,且两

侧土体的应力差异较大。在竖向上,深部土体的应力变化较浅部大;水平方向上,同一地层应力变化的幅度沿断裂附近向两侧区域逐渐减小。位于主裂缝两侧地层的应力差异逐渐增大,也进一步表明了地下水

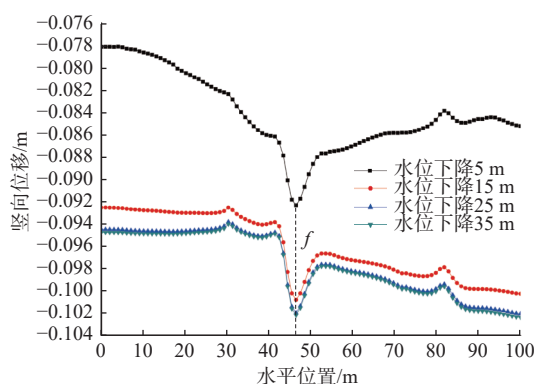


图8 地下水下降引起的地表竖向位移曲线

Fig. 8 Ground surface vertical displacement curves caused by groundwater level descent

位下降对主裂缝的扩展延伸具有的加剧作用。

4.3 综合分析

对比分析断裂活动和抽水 2 种工况的模拟结果,发现断裂活动对模型地层整体应力重分布的影响更为全面,尤其对于上盘次级裂缝的扩展延伸影响明显,对地层可产生剪切作用和拉张作用;地下水位的下降会导致裂缝附近产生地面沉降,且两侧土体在水平方向上靠近裂缝运动,可引起主裂缝的继续扩展,对地层主要产生拉张作用;另外,断裂活动对地层的影响范围比抽水作用的影响范围更大,两种工况都会引起隐伏裂缝的不断延伸扩展。

5 地裂缝耦合成因机制

5.1 地裂缝与下伏断裂的关系

野外勘察结果表明,北京通州宋庄地裂缝沿线大部分灾害点都分布在南苑—通县断裂上盘 200 m 范围内,地裂缝走向与断裂走向近平行,在延伸方向和致灾性上不受地形地貌变化的影响,继承了断裂长距离延伸和定向性强的特征,也同时体现了地裂缝灾害的不可抗拒性(图 1);另外,地裂缝上盘相对下降,与断裂倾向一致,同时裂缝倾角与断裂构造面倾角接近,剖面特征揭示断裂带上断点延伸至第四系内部,地裂缝沿着构造破裂面延伸扩展;深部地层主要表现为位错,断距随地层沉积年代的增加而增大,体现了其具有同沉积断层的活动特点,总体表明该地裂缝活动受南苑—通县断裂控制作用明显,断裂的存在为该裂缝的产生提供了重要的基础条件。

5.2 地裂缝与开采地下水的关系

通州区年降雨量较均匀,一般在 500 mm 左右,降雨时间主要集中在每年的 6—9 月份,占全年降雨量

的 70%~80%,年补给地下水量变化不大,深层承压水是该区工业和生活用水的主要来源。根据相关监测资料,近年来,该区地下水水位总体呈下降趋势,最大水位下降速率为 2 m/a,尤其是发育地裂缝的宋庄镇为地下水严重超采区,其地下水埋深大于周围无地裂缝地区;作为主要目标开采层的第二、三承压含水层,水位总体上处于波动下降阶段,截止到 2015 年水位降深达 10 m 以上,而该时间段正是宋庄地裂缝发育最为迅速和剧烈的时期,表明该地裂缝的扩展与地下水水位降低有极强的关联性。

此外,地裂缝最为发育的双埠头村的地面沉降速率也最大,其地表形变以拉张破坏为主,而在沉降速率较小的沟渠村、大庞村和平家疃村附近,地裂缝破坏点的密度和破坏程度均有所减小,表明在区域尺度上,地裂缝的扩展与地面差异沉降具有一定的相关性,在地下水位下降较大的地区,地面沉降发展速率明显加大,累计地面沉降量较大,地裂缝活动程度也较为剧烈(图 1、图 9)。地下水开采的不断加剧,引起地下水位的大幅度下降,地表产生差异化运动,表现为不均匀沉降,并在边缘造成拉应力集中,同时土体的压密又反作用于水,使得内部孔隙水压力发生改变,有利于原有裂缝不断伸展扩张,导致浅表层裂缝的水平张开量持续加大。

5.3 成因机理

综上所述,北京宋庄地裂缝属于构造断裂和开采地下水共同作用影响下的典型的耦合成因型地裂缝,南苑—通县断裂是该地区地裂缝形成的背景条件,造成两侧地层错断,控制了地裂缝的初步形态、发育活动、平面分布和延伸方向,裂缝沿构造破裂面逐渐向上延伸至地表,并导致已有裂缝不断扩张,上盘也出现有位错现象的次级裂缝,形成地裂缝带,为深部断裂破碎带活动的地表反应;超采地下水起到了激发原有裂缝在浅表层扩张的作用,是当前地裂缝超常活动的重要诱发因素,抽水活动的不断加强,必然引起地下水位的大幅度下降,地表土体产生差异性运动,并在沉降中心边缘造成应力集中和形成拉张区,使得土体的应力应变状态发生改变,在主裂缝两侧出现了拉张性的次生裂缝。

此外,由于现阶段该断裂的活动速率较小,加上通州地区第四系地层的厚度较大,下部断裂的微弱活动对浅部地层的影响作用相对较小。综合分析认为,近年来,对于该耦合型地裂缝的异常活动扩展,其中超采地下水诱因的影响程度要大于构造断裂的作用,

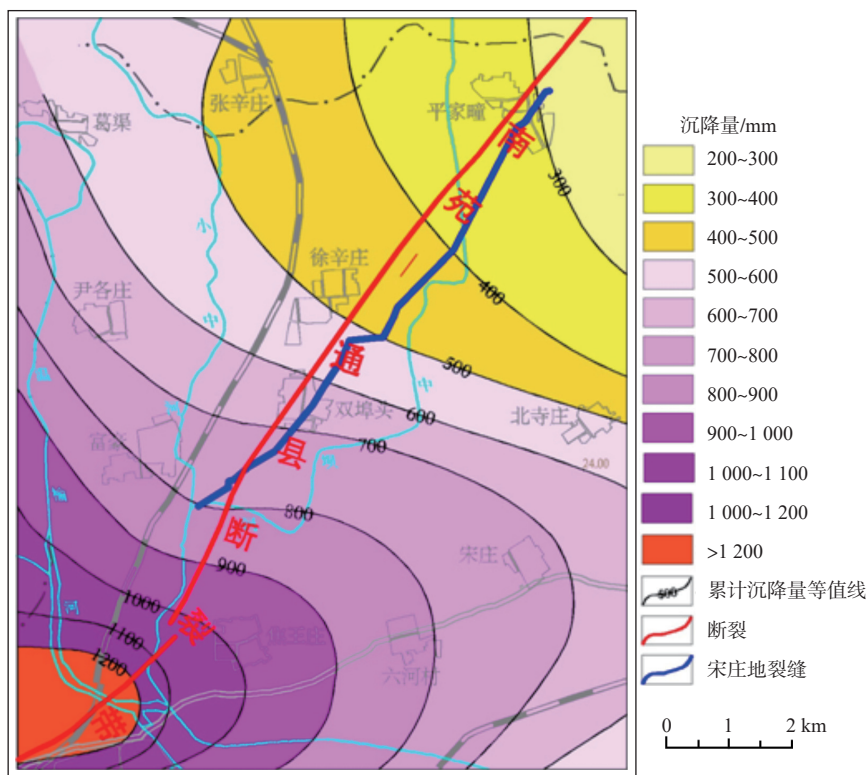


图9 宋庄地区累计地面沉降量平面分布图

Fig. 9 Cumulative land subsidence in the Songzhuang area

地裂缝现代活动的主要驱动力为抽水作用,故在地表大多表现出新生地裂缝的扩张特征。同时,地下水下降的过程是流固耦合的过程,渗流使得颗粒逐渐运移压密,表现为地层的不均匀沉降。模拟结果也表明了,在断裂和抽水活动2种因素的耦合作用下,地裂缝的发展会更加迅速,活动强度和影响范围也会增大。

6 结论

(1)宋庄地裂缝在地表呈线性带状展布,整体走向NE31°,延伸总长度8.7 km,影响带宽度范围为20~160 m,造成地表平均横向拉张速率为0.8 cm/a,该地裂缝具有三维活动性、延伸定向性、分段差异性、致灾不可抗拒性等特点;在浅部地层剖面上,破坏主要以拉张开裂为主,而深部裂缝两侧的地层断距随沉积年代的增加而增大,且裂缝活动特征与地下水开采及地面沉降有很好的相关性,属典型的耦合成因型地裂缝。

(2)数值模拟结果表明,断裂活动对模型地层的应力重分布有重要影响,裂缝附近为应力集中区,上盘地层拉张区的范围大于下盘挤压区范围;断裂活动造成上盘地层产生较大的竖向位移,引发隐伏裂缝不断向上延伸,并衍生次级裂缝。

(3)地下水位的持续下降在地表形成了以地裂缝为中心的集中沉降区,上盘地表的沉降范围大于下盘;抽水活动对于裂缝的垂向和水平方向的扩展延伸均有加剧作用。

(4)耦合型地裂缝活动受断裂控制作用明显,裂缝沿断裂分布,下伏断裂构成了地裂缝的原型,超采地下水激发了隐伏地裂缝活动,并加剧了裂缝扩张,现今地裂缝的超常活动主要为地下水环境场变化和地面沉降所致。下一步将继续开展耦合型地裂缝多工况的数值模拟,并结合现场系统勘察、监测和物理模拟等手段综合研究,阐明该类型地裂缝的内在耦合与互馈机制。

参考文献 (References) :

- [1] AYALEW L, YAMAGISHI H, REIK G. Ground cracks in Ethiopian Rift Valley facts and uncertainties[J]. Engineering Geology, 2004, 75(3/4): 309-324.
- [2] HOLZER T L. Ground failure induced by ground-water withdrawal from unconsolidated sediment[C]// HOLZER T L. Man-induced land subsidence. Boulder: Geological Society of America, 1984: 67-106.
- [3] 邵长庆, 杨强, 李浩, 等. 活动断层作用下地裂缝开裂

- 机理研究[J]. *水文地质工程地质*, 2019, 46(4): 34 – 41. [SHAO Changqing, YANG Qiang, LI Hao, et al. A study of the cracking mechanism of ground fissures under the action of active faults[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2019, 46(4): 34 – 41. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 李志明, 杨旭东, 兰剑梅, 等. 河北邢台柏乡地裂缝成因分析[J]. *水文地质工程地质*, 2010, 37(2): 135 – 138. [LI Zhiming, YANG Xudong, LAN Jianmei, et al. An analysis of earth fissure at Baixiang County, Xingtai City[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2010, 37(2): 135 – 138. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 贾润幸, 方维萱, 张建国, 等. 山西清徐—太谷地区地裂缝形成机理[J]. *地质通报*, 2022, 41(7): 1282 – 1290. [JIA Runxing, FANG Weixuan, ZHANG Jianguo, et al. The formation mechanism of ground fissures in Qingxu-Taigu area, Shanxi Province[J]. *Geological Bulletin of China*, 2022, 41(7): 1282 – 1290. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 汪丽, 李新生, 李同录. 隐伏地裂缝扩展的大型原位浸水试验研究[J]. *地质力学学报*, 2019, 25(3): 412 – 420. [WANG Li, LI Xinsheng, LI Tonglu. Large-scale in-situ submerging experiment on buried ground-fissures expansion[J]. *Journal of Geomechanics*, 2019, 25(3): 412 – 420. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 谭鹏, 刘阳, 蒋富强, 等. 肯尼亚裂谷区地裂缝特征及成因分析[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2021, 32(6): 53 – 62. [TAN Peng, LIU Yang, JIANG Fuqiang, et al. Analysis of the characteristics and causes of ground fissures in Kenya rift region[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2021, 32(6): 53 – 62. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 乔建伟. 基于地球关键带理论的渭北台塬地裂缝成因机理研究[D]. 西安: 长安大学, 2018. [QIAO Jianwei. Study on the formation mechanism of ground fissures in Weibei Terrace based on earth's critical zone theory[D]. Xi'an: Changan University, 2018. (in Chinese with English abstract)]
- [9] PENG Jianbing, HUANG Qiangbing, HU Zhiping. A proposed solution to the ground fissure encountered in urban metro construction in Xi'an, China[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2017, 61: 12 – 25.
- [10] 彭建兵, 范文, 李喜安, 等. 汾渭盆地地裂缝成因研究中的若干关键问题[J]. *工程地质学报*, 2007, 15(4): 433 – 440. [PENG Jianbing, FAN Wen, LI Xi'an, et al. Some key questions in the formation of ground fissures in the Fen-Wei Basin[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2007, 15(4): 433 – 440. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 武强, 陈佩佩, 张宇, 等. 我国城市地裂缝灾害问题与对策[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2002, 13(2): 70 – 72. [WU Qiang, CHEN Peipei, ZHANG Yu, et al. The problem and countermeasure of ground fracture in city[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2002, 13(2): 70 – 72. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 赵忠海. 北京地区地裂缝灾害的分布特征及其成因探讨[J]. *地质灾害与环境保护*, 2006, 17(3): 75 – 78. [ZHAO Zhonghai. Discussion on the distribution characteristics and genetic type of the land crack in Beijing[J]. *Journal of Geological Hazards and Environment Preservation*, 2006, 17(3): 75 – 78. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 贾三满, 刘明坤, 田芳, 等. 北京地区地裂缝分类及防治措施[J]. *城市地质*, 2011, 6(2): 4 – 7. [JIA Sanman, LIU Mingkun, TIAN Fang, et al. The classification of ground fissures and their prevention measures in Beijing area[J]. *Urban Geology*, 2011, 6(2): 4 – 7. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 田苗壮, 王荣, 赵龙, 等. 高密度电法在北京宋庄地裂缝中的应用[J]. *上海国土资源*, 2017, 38(3): 90 – 93. [TIAN Miaozhuang, WANG Rong, ZHAO Long, et al. High-density electrical method application in the Beijing Songzhuang ground fissure[J]. *Shanghai Land & Resources*, 2017, 38(3): 90 – 93. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 刘德成, 靳小平, 周自梁. 灰色关联度分析法在北京通州区地裂缝灾害危险性评价中的应用[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2010, 21(3): 73 – 76. [LIU Decheng, JIN Xiaoping, ZHOU Ziliang. Application of grey degree of association evaluation method in ground fissures in Tongzhou District of Beijing[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2010, 21(3): 73 – 76. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 刘方翠, 祁生文, 彭建兵, 等. 北京市地裂缝分布与发育规律[J]. *工程地质学报*, 2016, 24(6): 1269 – 1277. [LIU Fangcui, QI Shengwen, PENG Jianbing, et al. Characters of the ground fissures developing in Beijing[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2016, 24(6): 1269 – 1277. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 赵龙, 李玉梅, 崔文君, 等. 北京宋庄地裂缝灾害特征及影响因素分析[J]. *工程地质学报*, 2018, 26(6): 1600 –

1610. [ZHAO Long, LI Yumei, CUI Wenjun, et al. Disaster characteristics and influence factors for ground fissures at songzhuang village in Beijing[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2018, 26(6): 1600 – 1610. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 赵龙, 罗勇, 李玉梅, 等. 北京平原区地裂缝受灾体形态特征及影响因素[J]. *水文地质工程地质*, 2019, 46(6): 156 – 164. [ZHAO Long, LUO Yong, LI Yumei, et al. Characteristics of disaster-affected bodies and influence factors for earth fissure in Beijing Plain[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2019, 46(6): 156 – 164. (in Chinese with English abstract)]
- [19] HERNANDEZ-MARIN M, BURBEY T J. Controls on initiation and propagation of pumping-induced earth fissures: Insights from numerical simulations[J]. *Hydrogeology Journal*, 2010, 18(8): 1773 – 1785.
- [20] LOUKIDIS D, BOUCKOVALAS G D, PAPADIMITRIOU A G. Analysis of fault rupture propagation through uniform soil cover[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2009, 29(11-12): 1389 – 1404.
- [21] ANASTASOPOULOS I, GAZETAS G, BRANSBY M F, et al. Fault rupture propagation through sand: finite-element analysis and validation through centrifuge experiments[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2007, 133(8): 943 – 958.
- [22] 王海刚, 刘明坤, 贾三满, 等. 基于FLAC^{3D}的北京高丽营地裂缝模拟[J]. *南水北调与水利科技*, 2013, 11(5): 86 – 90. [WANG Haigang, LIU Mingkun, JIA Sanman, et al. Simulation of gaoliying ground fissure based on FLAC^{3D}[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2013, 11(5): 86 – 90. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 王启耀, 蒋臻蔚, 彭建兵. 抽水作用下先存断裂活化滑移机制研究[J]. *水文地质工程地质*, 2013, 40(2): 108 – 112. [WANG Qiyao, JIANG Zhenwei, PENG Jianbing. Mechanism of reactivation and slip of the preexisting fault under pumping[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2013, 40(2): 108 – 112. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 赵龙, 刘久荣, 王荣, 等. 北京宋庄地裂缝分布特征及成因分析[J]. *上海国土资源*, 2017, 38(2): 35 – 38. [ZHAO Long, LIU Jiurong, WANG Rong, et al. Distribution characteristics and cause analysis of Songzhuang ground fissures in Beijing[J]. *Shanghai Land & Resources*, 2017, 38(2): 35 – 38. (in Chinese with English abstract)]
- [25] 蒋臻蔚, 彭建兵, 王启耀. 抽水作用下先期断裂对地裂缝的影响研究[J]. *工程地质学报*, 2010, 18(5): 651 – 656. [JIANG Zhenwei, PENG Jianbing, WANG Qiyao. Influence of pre-existing fault on ground fissures during pumping action[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2010, 18(5): 651 – 656. (in Chinese with English abstract)]
- [26] 李宁, 李明, 赵法锁, 等. 基于FLAC^{2D}的西安地面沉降数值模拟分析[J]. *灾害学*, 2013, 28(3): 210 – 214. [LI Ning, LI Ming, ZHAO Fasuo, et al. Numerical simulation analysis of xi'an land subsidence by FLAC^{2D}[J]. *Journal of Catastrophology*, 2013, 28(3): 210 – 214. (in Chinese with English abstract)]
- [27] 戴文彬. 抽水地面沉降对地铁隧道变形的影响研究[D]. 西安: 长安大学, 2013. [DAI Wenbin. Study on the effect of land subsidence on subway tunnel structure[D]. Xi'an: Changan University, 2013. (in Chinese with English abstract)]
- [28] 陈育民, 徐鼎平. FLAC/FLAC3D基础与工程实例[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009. [CHEN Yumin, XU Dingping. FLAC/FLAC3D foundation and engineering example[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2009. (in Chinese)]

编辑: 王支农