

断裂错动与水作用下的地层位移及应力变化

孟振江^{1,2}, 彭建兵^{1,2}, 程国明³, 郭海朋³, 王海刚³, 范文东⁴, 杨争⁴

(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. 中国地质环境监测院, 北京 100081; 4. 西北综合勘察设计院, 陕西 西安 710003)

摘要: [目的] 在断裂活动和地下水位变化条件下, 对地裂缝上下盘地层的沉降位移与应力变化进行分析, 为深入研究地裂缝的形成机理提供参考。[方法] 以北京市高丽营地区地裂缝为研究背景原型, 基于其活动特征, 分析了该地裂缝的发育与断裂构造及地下水水位变化之间的关系, 并运用数值模拟方法分别研究了两种诱因作用下模型地层的沉降位移及土体内部应力的变化规律。[结果] 断裂错动作用下, 地裂缝上盘土层的沉降变形响应程度大于下盘, 地表竖向位移变化曲线近似呈反“S”形态, 且上盘应力降低区的范围大于下盘应力增强区的范围; 地层沉降量随地下水位的下降而不断增加, 其土体应力变化曲线呈“中心对称”。[结论] 断裂两侧附近的土体沉降位移和应力变化的差异较明显, 且差异沉降与水位降深呈正相关, 地下水位下降易诱发地裂缝的影响范围是上盘 45 m 和下盘 35 m, 研究成果可为地裂缝灾害地区的防灾减灾提供科学的理论依据。

关键词: 地裂缝; 断裂错动; 地下水; 沉降位移; 竖向应力

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2018)03-0053-07

中图分类号: P642.21

文献参数: 孟振江, 彭建兵, 程国明, 等. 断裂错动与水作用下的地层位移及应力变化[J]. 水土保持通报, 2018, 38(3): 53-59. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2018.03.009. Meng Zhenjiang, Peng Jianbing, Cheng Guoming, et al. Change of stratum displacement and stress induced by fault dislocation and groundwater [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(3): 53-59.

Change of Stratum Displacement and Stress Induced by Fault Dislocation and Groundwater

MENG Zhenjiang^{1,2}, PENG Jianbing^{1,2}, CHENG Guoming³,

GUO Haipeng³, WANG Haigang³, FAN Wendong⁴, YANG Zheng⁴

(1. College of Geology 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, Shaanxi 710054, China; 3. China Institute of Geo-environment Monitoring, Beijing 100081, China; 4. Northwest Research Institute of Engineering Investigations and Design, Xi'an, Shaanxi 710003, China)

Abstract: [Objective] To analyze the change of stratum displacement and stress induced by fault dislocation and groundwater level change in the hanging wall and the foot wall of ground fissure in order to provide references for the further research in the formation mechanism of ground fissures. [Methods] Taking Gaoliying ground fissure in Beijing City as research background prototype, the relationship between the formation of ground fissure and fault tectonic activity, and the change of groundwater level were analyzed, based on the activity characteristics of the ground fissure. The change law of modeled stratum displacement and soil internal stress induced by these two inducing factors was studied using numerical simulation. [Results] Due to the fault dislocation, the settlement deformation on the hanging wall was greater than the foot wall, the curve of vertical displacement of surface showed an opposite “S” shape, and the range of the stress reduction zone of the hanging wall was larger than the range of the stress enhancement zone on the foot wall. Stratum settlement amount increased with the decline of groundwater level, and the stress curve was approximately “centrosymmetric”.

收稿日期: 2018-01-10

修回日期: 2018-04-03

资助项目: 国家自然科学基金(973)发展计划项目“黄土重大灾害成灾机理及灾害链演化规律”(2014CB744702); 中国地质调查局项目“京津冀地区地面沉降地裂缝调查及地质环境监测”(DD20160235); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(310826174001)

第一作者: 孟振江(1984—), 男(汉族), 河南省濮阳县人, 博士, 工程师, 主要从事地质工程与地质灾害研究。E-mail: mengzj@chd.edu.cn.

[Conclusion] The differences in settlement displacement and stress changes between the two sides of the fault were significant. The differential settlement was positively correlated to the descent of groundwater level, and the influence range of ground fissure induced by descent of groundwater level was 45 m on the hanging wall while 35 m on the foot wall. The research results can provide scientific theoretical basis for disaster prevention and mitigation in the ground fissure areas.

Keywords: ground fissure; fracture dislocation; groundwater; settlement displacement; vertical stress

地裂缝是一种由内、外地质营力及人类活动等因素共同作用形成的渐进性地质灾害,主要表现为地表破裂变形,且随着人类活动的不断加剧,地裂缝导致的各种灾害日益严重^[1]。查明地裂缝的发育特征及其成因机制,采取可靠的防控措施,是做好地裂缝灾害防治工作的关键^[2]。国外许多专家学者针对具体某地区地裂缝的成因机理开展了大量研究:Leonard^[3]从振动角度分析了美国亚利桑那州 Picacho 城地裂缝的成因,较早提出了构造成因说;Lofgren 等^[4]提出“渗透应力拖拽作用”,认为地下水从沉降漏斗边缘向中心流动的过程中,所产生的渗透应力对含水层框架起到了粘附拉拽作用,从而引起上部地层的应变集中,导致土体表面开裂破坏;Schumann 等^[5]认为地裂缝是在地表压缩过程中,因拉张应力集中导致沉降差异较大的土层产生的变形开裂;Holzer 等^[6]通过长期监测亚利桑那州中南部构造盆地内地裂缝的活动情况,认为该地区构造活动与地下水开采是引起地裂缝发育及活动的两个主要因素。

中国北京市顺义区高丽营镇发育的地裂缝自地球物理勘探发现以来就引起了高度关注,该地裂缝活动导致周边建筑及公共设施均遭到严重破坏,给当地经济建设造成了巨大威胁与损失。很多专家学者针对高丽营地裂缝开展了专门的调查和研究工作,对其成因观点也是众说纷纭:贾三满等^[7]认为高丽营地裂缝主要受断裂控制,是基底断裂活动在地表的延伸,为断裂构造与地下水超采引起的地面沉降叠加作用的结果;彭建兵等^[8]在顺义区土沟村发现地裂缝的出露位置与高丽营断裂位置相吻合,并通过钻探手段揭示了该地区深部地层的断距较浅部地层大,认为该地裂缝与下伏断裂相连,具有同沉积断层的活动特点;王海刚等^[9-10]认为高丽营地裂缝是复合型地裂缝,并通过数值计算确定了该地裂缝的安全避让带宽度为 90 m。随着对北京高丽营地裂缝研究的不断深入,越来越多的专家学者趋于耦合成因说,即认为该地区地裂缝的形成和发育主要受黄庄—高丽营断裂活动的控制,而地下水的过量开采起到了一定的诱发和加剧作用,现阶段地裂缝的超常活动是二者共同作用的结果。上述研究成果为高丽营地裂缝成因机制的进一步深入研究奠定了重要基础。

然而,总体上看,目前有关高丽营地区地裂缝的研究大都局限于其宏观成因判别和定性评价,且多为其灾害特征的描述,很少从微观角度进行定量研究,相对应的数值模拟研究也鲜有涉及。断裂活动与地下水位下降两种致灾因素对高丽营地裂缝的形成与发展的贡献作用如何?对上下盘地层的影响有何不同?地裂缝形成过程中地层的竖向位移及应力怎样变化?已成为迫切需要解决的科学问题。基于此,本文以北京市高丽营地裂缝为研究背景,在阐述其地质环境条件的基础上,归纳了该地裂缝的平面和剖面发育特征,分析了其活动特点与断裂错动及地下水位变化之间的对应关系;利用 FLAC 3D 有限差分软件,分别建立断裂错动和地下水位变化两种数值模型,重点分析了两种致灾因素作用下地层沉降位移与土体内部应力的变化规律,以期揭示二者对地裂缝形成的贡献作用。研究成果可为该地裂缝灾害地区的土地规划管理、地裂缝减灾防灾和地下水开发利用提供科学的理论依据。

1 研究区地质概况

1.1 地形地貌

北京市地处燕山台褶带和华北断拗两个构造单元的相交地带,断裂构造十分发育。高丽营地裂缝研究区位于北京市平原区北部,地貌单元总体属于温榆河冲洪积扇平原区,总体地势为北高南低。

1.2 地层岩性

已有基础资料表明,研究区上部地层为第四系松散堆积层,以南部温榆河冲积而成的河流相冲积物为主,一般发育在山前平原区。由于本区新构造运动造成的山区抬升以及平原与盆地的不均匀沉降,导致局部第四纪岩性的堆积厚度相差数百米不等,总体上由西北山前向东南逐渐增厚;其中浅部地层主要为上更新统马兰组、全新统上部刘斌屯组和全新统中部尹各庄组地层,基岩地层主要有侏罗系和寒武系—奥陶系地层,周边还有蓟县系、青白口系等。

1.3 区域地质构造

相关研究成果表明,中生代燕山运动以来,北京地区形成了一系列以北东向为主的断裂构造,而研究区位于北京西北隆起北部,在河北平原地震带西北的

北京地堑内,属于中强地震活动区。区内主要发育的断裂为黄庄—高丽营断裂,研究区的区域稳定性在一定程度上主要受其影响。该断裂延伸总长约 132 km,走向 $NE20^{\circ}\sim 50^{\circ}$,断裂面倾向 SE,倾角 $55^{\circ}\sim 75^{\circ}$,为全新世活动的高角度正断层。

1.4 水文地质工程地质条件

研究区内地下水由浅部潜水层及深部多层承压水层组成,含水层较多且厚度较薄,属弱富水区。据钻探资料显示,第一层潜水层静止水位埋深为 5.4~6.5 m,浅部 20 m 埋深内的潜水层主要由粉土层与少量砂层组成。深部承压含水层则由数层厚度不等的砂、砂砾石组成,也是本区主要的人工开采水层,随着开采强度不断地增大,地下水水位年降低幅度持续增大。结合周边的深孔资料,该区域地层在 100 m 深度范围内,除表层厚度较小的耕植土及填土外,下部均为第四纪以来冲洪积作用形成的粉质黏土、粉土

及砂类土等,且在断裂带两侧的地层厚度差异较明显,上盘厚度一般大于下盘厚度。

2 高丽营地裂缝发育特征

2.1 地裂缝平面展布及活动特征

高丽营地裂缝是北京地区发育最为典型的地裂缝,最早发现于 20 世纪 70 年代,地裂缝整体沿黄庄—高丽营断裂带发育,走向呈 $NE45^{\circ}\sim 65^{\circ}$,呈线性带状分布,近平行于深部断裂走向,表明了断裂活动对高丽营地裂缝的发育具有明显的控制作用^[8-11]。根据现场调查发现,地裂缝延伸发育总长度约 10 km,主变形影响带宽度为 30~70 m;裂缝水平拉张和水平扭动量较小,水平张开量一般为 0.5~1.5 cm,主裂缝导致的垂直位错现象较明显,沿线地表最大垂直位错量范围为 14.8~48.6 cm,均表现为东南低、西北高;地裂缝通过处造成多处墙体开裂变形、地表塌陷及位错(图 1)。



图 1 地裂缝活动造成的地表及建筑物破坏现象

高丽营地裂缝活动呈现年内周期性变化规律,每年的 4—7 月为地裂缝的活跃期,占全年活动量的

60%~70%。根据北京市地质环境监测总站对该地裂缝的三维自动化监测资料表明,2010 年以来该地

裂缝年均垂直活动速率为 8.72 mm/a;另外根据地裂缝活动影响范围内的地表位错量、建筑物和路面的使用年限及破裂情况估算,该地裂缝综合平均年活动速率为 8.8~16.2 mm/a。历史监测资料表明高丽营地裂缝在垂直方向上的最大活动速率约为 18 mm/a。此外,焦青等利用断层位移监测台站多年的监测资料对黄庄—高丽营断裂的现今活动分析认为,该断裂的整体活动速率为 0.11~0.77 mm/a,可见,以上地裂缝活动速率的相关监测数据都远大于华北地区活动断裂平均为 1 mm/a 的活动速率^[10-15]。

2.2 地裂缝与深部断裂的关系

为揭示高丽营地裂缝的剖面结构特征,课题组在北京市昌平区小汤山镇土沟村开挖了长 65 m、深度 6 m 的探槽,槽口宽 6 m,探槽整体走向 NW35°;探槽壁揭露了地层剖面上发育了 3 条近平行的裂缝,呈羽状组合型态,且均造成地层错断;主地裂缝走向 NE65°,倾向 SE,倾角 80°,向上延伸至地表并造成西侧探槽壁外露的红褐色粉质黏土层的上下盘的断距达 116 cm。3 条地裂缝分别错断褐黄色细砂层 57,15 和 13 cm,在地裂缝两侧附近的累计断距为 85 cm,根据探槽剖面揭示的该细砂层整体的变形统计,总断距达到了 141 cm。现场钻探剖面资料表明,地裂缝造成该区埋深 6 m 处的地层垂直错距为 0.55~1.43 m,埋深 18 m 处地层的错距为 1.6~2.0 m,埋深 25 m 地层的错距为 1.9~2.2 m,埋深 36 m 位置地层的错距达 3.6~4.2 m,且上下盘两侧地层在剖面上表现为台阶状下错,体现了同沉积断层的特征,即断距随着地层沉积年代的增加而逐渐增大,另外,物探结果也表明了下伏断裂的位置与地表出露裂缝的位置相吻合^[16-17]。可见,黄庄—高丽营断裂控制了该地裂缝的平面分布、延伸方向以及地裂缝场地的地层和地貌变化。高丽营地裂缝的剖面特征表明该地裂缝发育和活动受断裂的控制作用明显,地裂缝沿构造破裂面逐渐向上扩展延伸至地表,并造成地层错断,为深部断裂在地表的露头。

2.3 地裂缝与地下水位变化的关系

由于研究区自 20 世纪 80 年代初期工农业活动逐渐开始频繁,加大了地下水的开采量,导致地下水水位持续下降。高丽营地裂缝带沿线地区地下水的主要排泄途径为人工开采,尤其是西王路村和八仙别墅等地裂缝活动明显区域的生产生活用水均来自井水开采。据北京市水文地质工程地质大队监测的位于昌平小汤山地区(北七家镇 NNW 方向 6 km)的 C206-3 A 号深层承压水分层观测井数据表明,浅层承压含水层的水位基本稳定,而中深部承压含水层水

位降幅较大,地下水标高从 1989 年的 17.6 m 降至 2008 年的 4.6 m 左右,年均降幅约 0.7 m。顺义区后沙峪 260 m 深承压水水位埋深下降也比较明显,从 2004 年 4 月的 28.2 m 下降到 2010 年 1 月的 44.8 m,不少地段的承压水水位下降速度都超过了 2 m/a。另外,位于昌平区北七家镇曹碾村 C212-2 A 号地下水承压井的水位监测数据表明,该处承压水水位年内呈现季节性变化的规律,总体上也呈下降趋势,如 2004 年 1 月该孔的承压水水位为 8.13 m,到 2009 年同期承压水水位为 6.25 m,下降了 1.88 m,至 2010 年 1 月,水位标高下降到了 3.76 m。

研究区近年来伴随着地下水水位的持续下降,形成了以昌平沙河—八仙庄为中心的沉降区,并在沉降中心出现了井管上升等现象。根据北京市地质环境总站资料,仅在 1955—2007 年间,沙河—八仙庄沉降区的最大累计沉降量就达到了 1 106 mm,至 2009 年该沉降中心累积沉降量达到了 1 163 mm,近 3 a 年平均沉降速率为 11.5~13.8 mm/a^[11,17]。综上所述,各类监测数据均表明了该地裂缝的超常活动与该地区超采地下水及地面沉降有关,由于处于沉降漏斗周围的土层存在压缩差异,导致裂缝在应力集中处产生并逐渐扩展。另外高丽营地裂缝的大规模剧烈活动与该区域地面沉降的产生在时间上也具有一致性,表明在断裂活动的基础上,超采地下水加剧了该地裂缝的活动程度。总体分析认为,先期存在的黄庄—高丽营断裂为地裂缝产生的主导因素,为其早期形成提供了基础背景,即下伏断层构成了地裂缝的原型,而在此基础上,现代人类水事活动激发了地裂缝的超常活动,并开启了地裂缝进一步的发展扩张,也就是说水的作用加剧了地裂缝现今活动的影响范围与强度。

3 断裂错动作用下的数值模拟

3.1 模型建立

首先,基于北京高丽营地裂缝发育地区的现场调查、钻探、槽探及监测数据等成果,并参考物探解译及地裂缝两侧地面沉降监测站的基岩标资料,对地层进行简化,建立三维地质结构模型,通过对位于北京昌平区未来科技城(小汤山镇土沟村附近)高丽营地裂缝发育地段的典型钻孔岩芯取样(孔深 60 m)及室内土工试验,得到了各试验土层的相关物理力学参数,为数值模拟提供了相关试验数据,计算参数见表 1。

为充分反映断裂错动作用下地层应力场和位移场的变化特征,并减小边界效应的影响,建立的数值计算模型尺寸选取:长×宽×高=100 m×10 m×50 m,简化的地层结构及厚度自上而下上分别为:①填土

6 m; ②粉质黏土 12 m; ③粉砂 8 m; ④粉质黏土 8 m; ⑤粉砂 12 m; ⑥基岩 4 m(为模拟断裂错动,将模型最下层的岩性设为基岩),断裂的倾角模拟取 75° (图 2)。断裂活动作用下地裂缝上、下盘地层之间的相对错动运用 FLAC 3D 有限差分软件中的 interface 接触单元来模拟。本次计算土体采用理想弹塑性模型,服从摩尔-库伦(Mohr-Coulomb)强度准则。

表 1 地层计算参数

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/ ($^\circ$)
粉土	17.0	4.0	0.2	15	15
粉质黏土	17.5	8.5	0.35	20	20
粉砂	18.0	9.0	0.30	0	30
粉质黏土	18.5	10.5	0.33	15	15
粉砂	19.5	12	0.30	0	30
基岩	25.0	10000	0.25	2000	40

注:断裂带接触面:法向刚度 = 1.00×10^8 Pa,切向刚度 = 1.00×10^7 Pa,黏聚力 = 0,摩擦角 = 10°

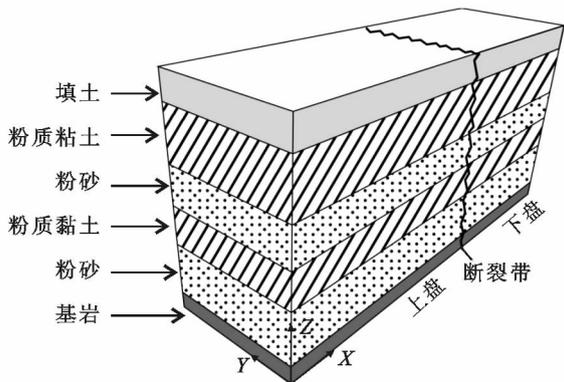


图 2 断裂错动作用下地层计算模型

3.2 边界条件与计算工况

计算时模型左右两端和前后分别施加 X 和 Y 方向的水平位移约束,断裂下盘地层底部固定,而上盘底部可以自由活动,通过控制上盘下降来模拟断裂的错动。模拟基岩上盘沿破裂面的错动量分别为 20, 40, 60 cm,主要分析研究模型土体内部应力及地层沉降形变位移的变化特征。

3.3 计算结果分析

3.3.1 地层竖向位移变化 为了更好地展现地层的竖向位移变化规律,取模型的一个剖面进行研究分析,断裂不同位错量下模型土体的沉降位移云见附图 1,可以看到:随着断裂位错量的增大,模型各土层的沉降量持续增加,且其沉降响应程度与范围也越来越大。下盘土体由于受边界条件的约束,整体沉降量较小,上盘土体的沉降量明显大于下盘,且位于上盘底部的土体

沉降响应最为突出。距断裂带越远的位移等值线越稀疏,而断裂带附近的竖向位移等值线较密集,说明当断裂错动时,位于断裂带附近的土体差异沉降较明显,且模型土体在剖面上存在一定的牵引扭拽现象。

另外,随着断裂错动,上下盘地层在模型尺寸范围内均有不同程度的沉降;随着位错量的增加,上盘地表沉降变形显著增大,而下盘的地表沉降变形增加量则较小;地表沉降量从下盘到上盘呈现不断增大的趋势,竖向位移变化曲线由平缓逐渐变得陡峭,整体近似呈反“S”形态。

3.3.2 土体竖向应力变化特征 断裂错动造成两侧土体在一定范围内应力场重新分布;在断裂带位置附近的土体竖向应力呈现下盘增大、上盘减小的趋势,且上盘应力降低区的范围大于下盘应力增强区的范围;断裂带附近两侧土体的应力差异较大,易形成地裂缝,而远离地裂缝位置的地层的竖向应力变化则较小;断裂底部区域为应力集中区,下盘地层的竖向应力最大,且随着断裂位错量的增加而不断增大,这是由于上盘上部土体不断向下挤压,通过断裂传递给下盘所致。

4 地下水位变化条件下的数值模拟

4.1 模型建立与边界条件

FLAC 3D 既可以单独进行流体计算,也可以进行流固耦合计算。本次地下水位变化的工况通过模拟承压水位的下降来实现,模型地层结构及土体相关参数的来源与设置与上节相同。由于地下水位的下降会引起土体固结压缩,且主要以竖向位移为主,因此将本次计算的位移边界条件设为:固定模型底部及四周位移,地表位移可自由变化^[18];为了模拟承压水水位的变化,设置渗流边界条件为:模型四周和底部设为不透水的边界,模型顶部为透水边界^[19]。根据高丽营研究区的水文地质条件,结合当地钻孔和地下水监测资料,将初始水位埋深设置为 6.5 m。水位以上为非饱和土体,水位以下为饱和土体。

4.2 渗流模型及流体参数

本次计算主要考虑土体竖向位移,故将模型上覆土体均设置为各向同性的渗流模型;由于底部基岩具有不透水性,将其设为不透水材料模型^[20]。根据收集资料及所取土样的室内试验数据,将流体(水)模量设为 2.00×10^3 Pa,流体密度为 1.0×10^3 kg/m^3 。为避免土体产生负的孔隙水压力,将流体的抗拉强度设为 0,土体的饱和度设为 1,不同地层的具体计算参数见表 2。

表 2 土体渗流计算参数

地层名称	渗透系数/ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	孔隙率	饱和度
①粉土	5.0×10^{-10}	0.38	1.0
②粉质黏土	2.0×10^{-13}	0.43	1.0
③粉砂	1.0×10^{-7}	0.40	1.0
④粉质黏土	2.0×10^{-13}	0.41	1.0
⑤粉砂	1.0×10^{-7}	0.39	1.0

4.3 计算工况

结合实际情况,设置地下水水位变化模拟步骤:首先,建立有限差分计算地质模型,为各层土体设置相应的计算参数;然后,设置初始水位,同时赋上各层土体的流体参数;其次,关闭渗流模式,计算初始地应力;再次,打开渗流模式,关闭力学计算,采用平面的渗流边界条件,从模型顶部抽取地下水,从而实现承压水位的变化;最后,关闭渗流模式,打开力学计算,对模型进行力学平衡计算^[21-22]。为了突出地下水水位变化对地裂缝的形成作用,并结合高丽营地裂缝附近地下水观测孔长期的监测数据,本次计算水位变化设为 3 个工况,即模拟地下水水位先后下降 6, 12, 18 m。

4.4 计算结果分析

4.4.1 地层沉降位移变化 随着地下水水位的不断下降,上盘地层整体的沉降响应大于下盘,且上部土体的沉降位移大于下部土体;上盘顶部在断裂带附近产生了较大的竖向位移,距离断裂带越远的土层沉降量越小,且越趋于均匀沉降,而下盘上部的土体沉降

响应则表现出相反的现象,即越靠近断裂带区域的土体沉降位移越小;断裂带两侧出现了明显的差异沉降,且随着地下水位的下降,上下盘地层的差异沉降愈明显,表明断裂两侧地层的差异沉降量与地下水水位降深呈正相关。

通过分析模型土体地表沉降位移随地下水水位降低的变化特征发现:当地下水位下降时,上下盘地表均出现不同程度沉降,地表沉降较明显的区域主要发生在上盘距断裂带约 45 m、下盘距断裂带 35 m 的范围内,表明该区域为地裂缝的易发区,也说明了地下水水位下降对上盘的影响范围大于下盘;上盘地表的差异沉降大于下盘,且位于断裂带两侧的差异沉降最大,地表出现陡坎;距离断裂带较远的区域表现为均匀沉降,且随着地下水位的持续下降,地表整体的沉降量也在不断增加。

4.4.2 地层应力变化规律 不同埋深下的土层竖向应力随地下水水位下降的变化曲线见图 3。可以看到:随着地下水位的逐渐下降,断裂带两侧的应力重新分布,同一地层应力的变化幅度沿水平方向由断裂带附近向两侧逐渐变小,平缓地裂缝上下盘的应力变化曲线近似呈“中心对称”,且随着地下水位的下降,地层应力持续减小,深部土体的应力变化比浅部土体更大;随着水位持续下降,断裂两侧上下盘同一深度的土体的竖向应力均逐渐减小,但位于断裂带附近两盘土体的应力差异逐渐增加,表明该处裂缝持续扩展并有向下延伸的趋势。

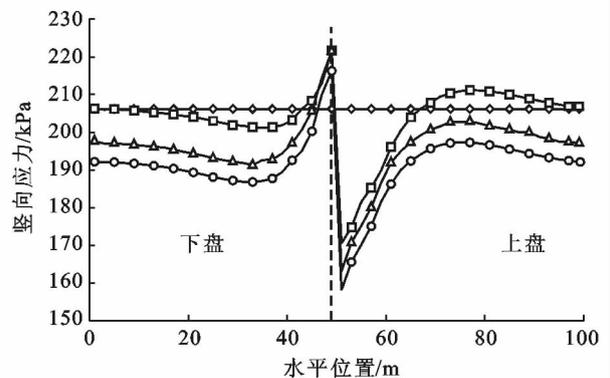
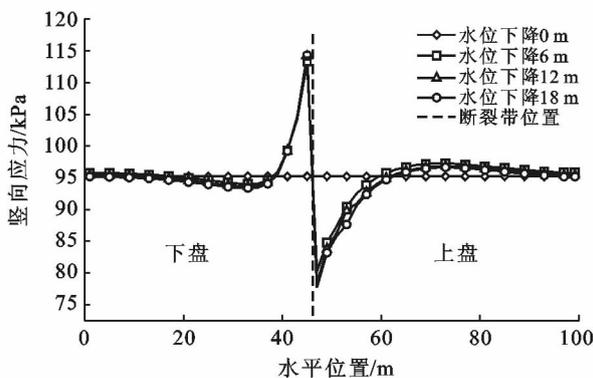


图 3 水位下降引起不同埋深地层的应力变化曲线

5 结论

本文选取诱发北京市高丽营地裂缝发育和活动的 2 个主要因素:断裂错动和地下水水位变化,分析了二者与地裂缝形成的关系,基于此,利用 FLAC 3D 有限差分软件模拟分析了断裂错动和地下水水位变化条件下地层沉降位移与土体内部应力的变化规律,得

出的主要结论如下:

(1) 在阐述该地裂缝形成的地质环境条件的基础上,综合运用多种勘察手段与监测资料揭示了地裂缝的平面和剖面活动特征,分析认为该地裂缝的发育和活动受先期存在的断裂构造的控制作用明显,而地下水的超采则在一定程度上激发和加剧了地裂缝的现今活动。

(2) 数值模拟结果表明,随着断裂上下盘地层位错量的增加,上盘地层沉降响应较明显,地表沉降变形从下盘到上盘具有逐渐增大的趋势,其竖向位移变化曲线整体呈反“S”形态;断裂两侧地层的差异沉降明显,并在模型剖面上呈现牵引扭拽现象。

(3) 断裂活动造成两侧土体在一定范围内应力场重新分布,上盘应力降低区的范围大于下盘应力增强区的范围,且上、下盘应力变化范围随着断裂位错量的增加均逐渐增大。

(4) 随着地下水水位的持续下降,断裂带两侧地层出现明显的差异沉降,且差异沉降量与水位降深呈正相关,其主要影响区域为距断裂带上盘 45 m 和下盘 35 m 范围内,是地裂缝的易发区,土层竖向应力变化曲线近似呈“中心对称”。

(5) 本文在模拟地下水水位变化时,设置的模型上、下盘地层的水位为整体同步下降,建议下一步研究应考虑模拟断裂两侧水位不均匀下降,或保持一侧地层的水位不变,仅控制另一侧水位下降等多种工况来进行对比研究。

[参 考 文 献]

[1] 王景明. 地裂缝及其灾害的理论分析与应用[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2000.

[2] 刘长礼, 王秀艳, 侯宏冰, 等. 我国城市地质灾害及其风险防控对策[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2013, 24(S): 313-316.

[3] Leonard R J. An earth fissure in southern Arizona[J]. Journal of Geology, 1929, 37(8): 765-774.

[4] Lofgren B E. Hydraulic stresses cause ground movement and fissures, Picacho, Arizona[J]. Geological Society American Abstracts Programs, 1978, 10(3): pp113.

[5] Schumann H H, Poland J F. Earth fissures, and ground-water withdrawal in south-central Arizona, USA [C]// Land Subsidence. Tokyo: International Association of Scientific Hydrology Publication, 1970: 295-302.

[6] Holzer T L. Ground failure induced by groundwater withdrawal from unconsolidated sediment [C]// Geological Society of America. Man-induced land subsidence:

Reviews in engineering geology, Colorado, 1984: 67-105.

- [7] 贾三满, 郭萌. 从高丽营探槽分析黄庄—高丽营断裂与地裂缝的关系[J]. 城市地质, 2007, 2(4): 24-28.
- [8] 彭建兵, 卢全中, 邓亚虹, 等. 国网智能电网研究院工程场地地裂缝勘察评价报告[R]. 西安: 长安大学工程设计研究院, 2010.
- [9] 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.
- [10] 王海刚, 杨艳, 刘明坤, 等. 基于自动化监测的北京高丽营地裂缝活动性分析[J]. 上海国土资源, 2013, 34(2): 64-67.
- [11] 马超. 北京高丽营地裂缝成因研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2011.
- [12] 刘明坤, 贾三满, 陈柘舟, 等. 北京平原区高丽营地裂缝带活动性及灾害特征研究[J]. 上海国土资源, 2014, 35(4): 53-57.
- [13] 姜媛, 王荣, 田芳, 等. 北京地区地面沉降与地裂缝关系研究[J]. 研究探讨, 2014, 9(4): 6-10.
- [14] 焦青, 邱泽华, 范国胜. 北京地区八宝山—黄庄—高丽营断裂的活动与地震[J]. 大地测量与地球动力学, 2005, 25(4): 50-54.
- [15] 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.
- [16] 冯利斌. 北京未来科技城地裂缝成因机理及其防治对策研究[D]. 西安: 长安大学, 2011.
- [17] 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.
- [18] 蒋臻蔚. 水作用下地裂缝成因机制及数值模拟[D]. 西安: 长安大学, 2011.
- [19] 李宁, 李明, 赵法锁, 等. 基于 FLAC2 D 的西安地面沉降数值模拟分析[J]. 灾害学, 2013, 28(3): 210-214.
- [20] 陈育民, 徐鼎平. FLAC/FLAC3 D 基础与工程实例 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009.
- [21] 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.
- [22] 范文东. 断裂活动与地下水作用下地裂缝成因机制研究 [D]. 西安: 长安大学, 2017.