

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2018.01.21

地裂缝活动作用下地层应力和位移传递规律研究

黄强兵^{1,2}, 马玉杰¹, 姜紫看¹, 陈 星¹

(1. 长安大学地质工程系, 陕西 西安 710054;

2. 长安大学西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710054)

摘要: 以西安地裂缝典型地段为研究对象, 建立基于实际地裂缝活动方式的地质力学模型, 通过 FLAC^{3D} 数值模拟, 研究地裂缝活动作用下地层应力和位移传递规律。结果表明: 地裂缝活动作用下, 地表竖向沉降变形曲线近似呈反“S”形, 表现出“牵引挠曲”现象, 水平位移曲线出现明显波峰现象; 随着地裂缝位错量的增大, 地表竖向和水平位移均逐渐增大; 基于地裂缝活动引起的地表变形平均倾斜值, 确定了地裂缝带影响区范围为上盘 21 m 和下盘 13 m。地裂缝活动引起两侧地层断距由深部到浅表部逐渐减小, 具有明显的变形传递衰减特征, 且地层断距随埋深的变化曲线可近似概化为一个四次多项式方程。地裂缝活动导致上盘地层出现应力降低区, 下盘地层出现应力增强区, 上盘应力降低区范围大于下盘应力增强区, 且上、下盘应力变化范围随着位错量的增大均逐渐增大。地裂缝活动作用下地裂缝两侧地层应力影响区随地层埋深的增大而增大, 其与埋深之间关系近似满足三次多项式方程。研究结果可为盆地断裂控制型地裂缝发育区的工程防灾减灾提供科学依据。

关键词: 地裂缝; 地层应力; 地表变形; 地层断距; 影响区范围

中图分类号: P551

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2018)01-0144-07

A study of the transfer law of formation stress and displacement induced by active ground fissures

HUANG Qiangbing^{1,2}, MA Yujie¹, JIANG Zikan¹, CHEN Xing¹

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

2. Key Laboratory of Western China's Mineral Resources and Geological Engineering, Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China)

Abstract: Based on the typical zones of ground fissures in Xi'an, the geological mechanics model of the actual activity mode of ground fissures is established. The transfer law of formation stress and displacement under the action of active ground fissures is studied with the FLAC^{3D} numerical simulation method. The results show that under the action of active ground fissures, the curves of ground vertical displacement exhibit an approximate reverse-S shape, indicating the phenomenon of traction deflection. The curves of horizontal displacement appear the phenomenon of an obvious peak. The vertical and horizontal displacement gradually increases with the settlement of the hanging wall of the increasing ground fissure. Based on the average ground deformation tilt values induced by ground fissures, the affected zone range of ground fissure belts is determined, which is 21 m in the hanging wall and 13 m in the footwall from ground fissures, respectively. The fault throw on both sides of the formation induced by ground fissures gradually decreases with the depth from deep to shallow surface, which is characterized by the obvious deformation transfer and attenuation. The curves of fault throw of formation variation with the buried depth can approximately be expressed using a quartic polynomial

收稿日期: 2016-12-23; 修订日期: 2017-05-22

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41372328; 41772274); 陕西省科技统筹创新工程计划课题(2011KTZB03-02-05)

第一作者: 黄强兵(1972-), 男, 博士, 教授, 主要从事地质工程与岩土工程等方面的教学与研究工作。E-mail: dcdgx24@chd.edu.cn

equation. Under the action of active ground fissures, there appears a stress reduced area in the hanging wall, which is bigger than the stress enhanced area in the footwall. The stress variation range in the hanging wall and the footwall gradually increase with the increasing settlement of the hanging wall. The relationship between the affected zone of the formation stress on both sides of ground fissures, which gradually increases with the increasing buried depth, and the buried depth approximately satisfies a cubic polynomial equation. The results can present a scientific basis for disaster prevention of active ground fissure zones controlled by basin faults.

Keywords: ground fissure; formation stress; ground deformation; fault throw of formation; affected zone range

地裂缝是一种典型的地质灾害,不同地区其成因不同,但多为地下水过量开采引起。全球许多国家与地区如美国、墨西哥、澳大利亚及非洲肯尼亚、埃塞俄比亚均有发育^[1~4]。在国内,西安、大同、无锡、邯郸、北京等城市地裂缝灾害较为严重,其中西安地裂缝最为典型。地裂缝活动引起地基或地层的不均匀沉降、地层应力的变化,常常导致建筑物及道路开裂、桥梁错断和地下管道拉断破坏。因此,开展地裂缝活动引起地层变形及应力场的变化特征研究,确定地裂缝带的影响区范围,从而为工程设计制定科学合理的避让方案,是地裂缝灾害防治最为重要的前提工作。

国内外关于地裂缝成因及其活动引起地层破裂、地表不均匀沉降开展了大量研究并取得了很多重要成果^[1~9],但这些研究多集中在宏观定性分析方面,已经开展的模型试验研究和数值计算在边界施加方面也均是采用上盘底部垂直下降的方式来模拟地裂缝的活动,只考虑了地裂缝的垂直位错分量,忽略了其水平位错分量的影响。同时,地裂缝两侧地层因地裂缝活动而产生错断,地层错断规律和影响范围等方面的研究还有待深入。鉴于此,本文以西安地裂缝(f_6)为研究对象,通过建立地裂缝地质结构模型,通过数值模拟计算来分析地裂缝活动作用下两侧地层中的应力变化和位移特征,确定和揭示地裂缝带影响区范围、地层错断及应力传递规律,为地裂缝灾害防治提供科学依据。

1 模拟背景

西安地裂缝是发育于临潼—长安断裂带上盘的正断层组,其发育历程50余年,截至目前共发现14条地裂缝横穿西安市区,影响面积约250 km²,总体走向基本一致,均为NEE向,每条地裂缝之间呈现似等间距排列的特征(图1)。以断裂构造的发育为基础,过量开采地下水为诱因的成因观点,认为西安地裂缝是土层中的剪切破碎带在近地表处的扩展延伸,但其真正原因却是由于过量抽取地下水,使弱透水层压缩而改变土层中的应力状态引起的。其中 f_6 、 f_7 地裂缝延伸最长,活动最为强烈,工程灾害也最为严重。本文以 f_6

地裂缝为原型和研究对象,开展地裂缝活动引起地层应力场和位移场的变化特征研究。

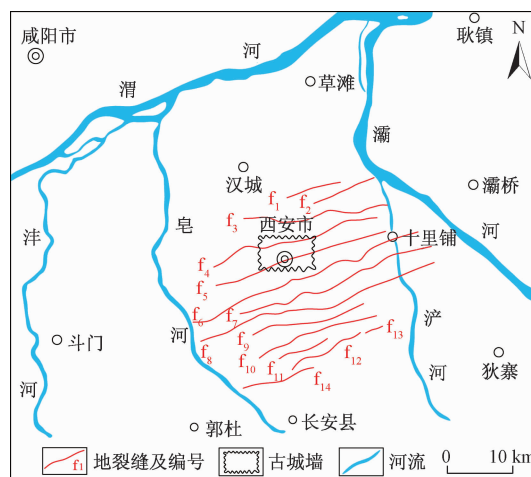


图1 西安地裂缝分布图

Fig. 1 Distribution of ground fissures in Xi'an

f_6 地裂缝沿交大黄土梁南侧发育,总体走向为NE 65°~75°;倾向SE,倾角75°~80°。西起丈八路、沙井村,经西斜北路过街天桥、南二环立交桥、建大北院、微波厂、秦川厂,东至纺织城国棉四厂北,发育带宽度达35~70 m,总长度17.3 km,地裂缝连贯性好,其西端隐伏,其余均已出露地表。 f_6 地裂缝带场地地层结构如下:地表分布为全新统人工填土(Q_4^{al});下面是全新统黄土(Q_4^{al})、上更新统风积新黄土(Q_3^{col})以及残积古土壤(Q_3^{ol}),底部为中更新统风积老黄土(Q_2^{col})和冲积粉质黏土(Q_2^{al})。自20世纪80年代以来, f_6 地裂缝持续强烈活动,对道路、桥梁及其他建构物造成了严重损坏,在南二环长安路地段立交桥附近形成宽达32 m的地裂缝变形带,垂直变形超过了20 cm,导致南二环路道路破坏、长安路立交桥桥梁错台开裂。目前该地裂缝仍在活动中。

2 数值计算模型

2.1 模型介绍

采用FLAC^{3D}有限差分软件,建立地裂缝活动作用

下的三维地层模型。由于西安地裂缝倾角一般大于 75° , 因此在模型中取 80° 。为了充分反映地裂缝活动作用下的地层应力和位移变化特征, 并减小边界效应的影响, 计算模型尺寸为: 地层长取 120 m, 横宽取 50 m, 埋深取 50 m, 数值计算模型见图 2。

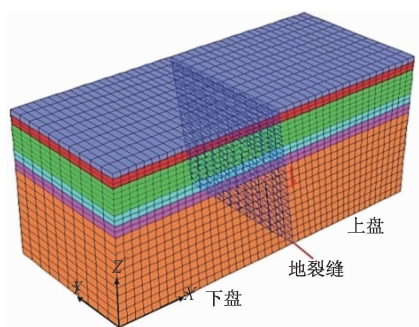


图 2 地层与地裂缝计算模型

Fig. 2 Calculation model of formation and ground fissures

2.2 边界条件及地裂缝活动模拟

计算模型两端和前后两侧分别施加 X 和 Y 方向的水平位移约束, 地裂缝下盘为稳定盘, 其底部施加 Z 方向竖向位移约束, 而上盘底部为自由可控活动边界。

地裂缝是一种破裂面, 常常被粉土、细砂等充填, 属于软弱结构面, 数值模拟中通过 FLAC^{3D} 中 interface 接触单元来模拟地裂缝上下盘之间的相对滑动 (图 3), 能够较好地反映其力学特性。

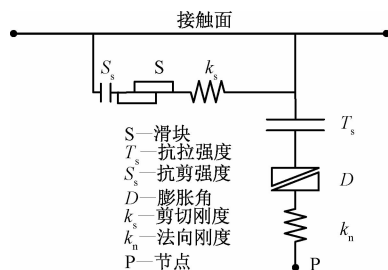


图 3 接触面力学机理

Fig. 3 Mechanical mechanism of interface

在地裂缝活动方式的模拟中, 以往均采用上盘垂直下降来模拟地裂缝的活动^[5-7] (图 4a)。在该模式下, 当地裂缝倾角较陡或近垂直且地裂缝位错量较小时, 所得结果基本合理, 误差较小。当地裂缝倾角相对较缓、位错量和地层厚度均较大时, 水平位错分量不容忽视, 采用图 4(a) 的模拟方式可能会导致试验或计算结果出现偏差。实际中地裂缝的活动方式一般均为下盘稳定, 上盘沿一定倾角 θ 的破裂面下滑 (图 4b) 且以垂直位错为主, 其中位错 S 、垂直位错分量 S_z 和水平位错分量 S_x 满足下列关系式 (图 5):

$$\frac{S_z}{S_x} = \tan\theta \quad (1)$$

$$\frac{S_z}{S} = \sin\theta \quad (2)$$

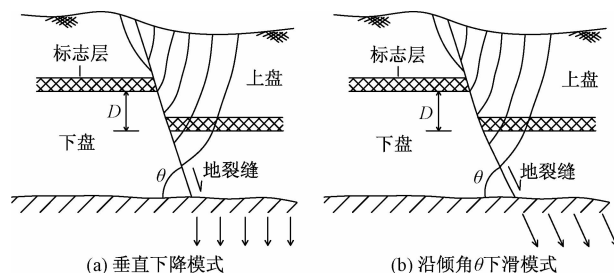


图 4 地裂缝活动模式示意图

Fig. 4 Schematic diagram of mode of active ground fissures

注: D —地裂缝垂直位错量; θ —地裂缝倾角

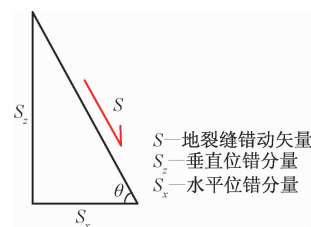


图 5 地裂缝位错分量示意图

Fig. 5 Schematic diagram of dislocation component of ground fissures

当地裂缝位错量较小时, 地裂缝活动以垂直位错为主, 此时仅考虑垂直位错 S_z 误差不大; 但当地裂缝位错量较大时, 水平位错分量 S_x 也较大, 不可忽视, 否则会使结果偏离实际情况。因此, 本文采用图 4(b) 的地裂缝活动模拟方式, 在数值计算模型中上盘底部施加强制位移的方式, 而是采用沿地裂缝破裂面下滑来控制模拟地裂缝上盘的下降过程 (图 4b 和图 5), 其模拟的地裂缝位错量 S 由式 (2) 中垂直位错分量 S_z 换算得到。为表达方便, 用不同垂直位错量 S_z 代表不同工况 (下文同), 实际上是将 S_z 换算成 S 施加到模型边界, 在 FLAC^{3D} 中是通过控制节点的速度矢量来实现上盘底部边界的强制位移 S 。

2.3 材料本构关系及计算参数

岩土体的数值分析离不开岩土材料的本构关系, 其精度在很大程度上取决于所采用本构模型的实用性和合理性。目前岩土体的本构理论主要有三大类: 弹性模型、弹塑性模型以及粘弹性模型。本文在分析时假定土体均为理想弹塑性材料, 采用摩尔-库仑 (M-C) 弹塑性本构模型。模型参数参照文 [2] 以及西安地铁一号线勘察报告确定, 具体计算参数见表 1。

表 1 有限元模型计算参数
Table 1 Calculation parameters of the finite element model

参数	重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	弹性模量 E/MPa	泊松比 μ	内聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	地层埋深 H/m
①杂填土 (Q_4^{ml})	17.3	1.2	0.35	16	10	1.70
②黄土 (Q_4^{el})	18.1	3.5	0.35	24	18	4.60
③黄土 (Q_3^{el})	18.5	4.0	0.30	30	20	13.0
④古土壤 (Q_3^{el})	19.0	4.5	0.30	35	22	16.4
⑤黄土 (Q_2^{el})	19.2	8.0	0.30	40	25	20.0
⑥粉质黏土 (Q_2^{al})	19.2	10.0	0.30	40	25	50.0
地裂缝	$K_n = K_s = 6.75 \times 10^4 \text{ kPa}, c = 10 \text{ kPa}, \varphi = 12^\circ$					

为了模拟地裂缝在长时间蠕变变形下的力学过程,分析地裂缝活动作用下地层应力及位移变化特征,考虑到西安地裂缝在 100 a 内的最大垂直位错量建议值为 500 mm^[2],模拟工况中分别取垂直位错量 $S_z=5, 10, 20, 30, 40, 50 \text{ cm}$ 。实际施加的位移 S 通过式(2)来确定,分别对应地裂缝位错量 $S=5.08, 10.15, 20.31, 30.46, 40.62, 50.77 \text{ cm}$ 。

3 计算结果及分析

3.1 地裂缝活动作用下位移变化特征

图 6~7 分别给出了地裂缝上、下盘垂直位错量(上盘相对下降,下同)即 $S_z=50 \text{ cm}$ 时的整体水平及竖向位移云图。由图可知,地裂缝上盘的竖向位移等值线要比下盘密集,这表明当上盘产生较大竖向沉降量时,上盘相对下盘的差异沉降较为明显;同样,两侧地层地表水平位移在地裂缝上盘附近较大,最大值约为 0.14 m,且地表上、下盘红色区域位移等值线明显密集,说明该位置处水平位移较大,易发生土体拉张破坏。

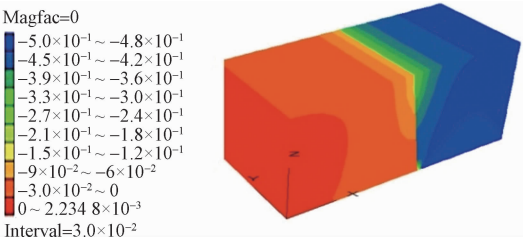


图 6 模型水平向位移云图 ($S_z=50 \text{ cm}$)
Fig. 6 Horizontal displacement nephogram of the model

图 8~9 分别为地表竖向及水平向位移变化曲线。从图 8 可以看出,地裂缝两侧存在着较为明显的差异沉降,地表沉降变形从下盘到上盘具有逐渐增大的趋势,曲线近似呈反“S”形;竖向变形梯度在下盘距地裂缝 20 m、上盘距地裂缝 30 m 范围内较大,此范围以外曲线变形梯度迅速减小,差异沉降变形亦逐渐减小。随着地裂缝垂直位错量 S_z 的增大,地表沉降变形逐渐增大,曲线由平缓逐渐变得陡峭,表现出“牵引挠曲”

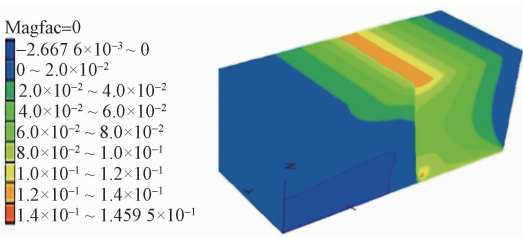


图 7 模型竖向位移云图 ($S_z=50 \text{ cm}$)
Fig. 7 Vertical displacement nephogram of the model

的现象。说明地裂缝活动引起地表的差异沉降变形主要集中在地裂缝附近 $L=50 \text{ m}$ 范围内即上盘 30 m、下盘 20 m,实测结果也表明了上盘 30 m 为地裂缝变形梯度陡变带(图 9),在此范围内的建(构)筑物易因地裂缝活动而产生差异沉降,导致其倾斜和开裂破坏,且地裂缝活动越强,地表差异沉降变形越大,所造成的破坏就越严重。

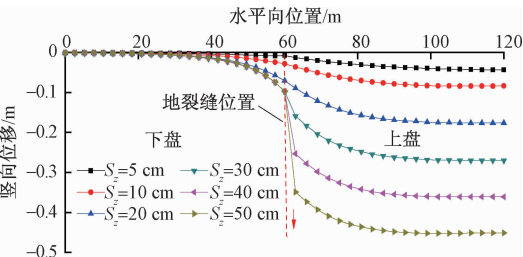


图 8 地表竖向位移变化曲线
Fig. 8 Vertical displacement curves of the ground surface

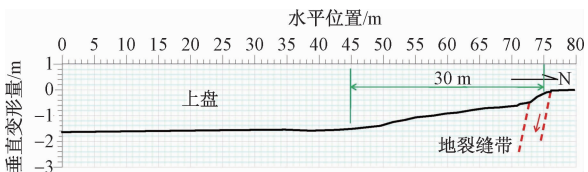


图 9 f_5 地裂缝西光 15 街坊地面形态实测曲线
Fig. 9 Measured settlement curve of ground surface of the f_5 ground fissure in Xiguang 15th housing block

由图 10 可知,地表水平位移也随着地裂缝垂直位错量 S_z 的增大而增大。当 $S_z=20 \text{ cm}$ 时,水平位移开始明显增大;地表水平向位移变化曲线出现明显波峰

现象,即地裂缝附近大(其中上盘一侧最大),而两侧逐渐减小的趋势。同时,水平位移峰值随着地裂缝垂直位错量的增大而逐渐向地裂缝处靠拢。这也很好地解释了地裂缝活动引起地表拉裂主要集中在地裂缝带附近及其上盘一侧的缘故。

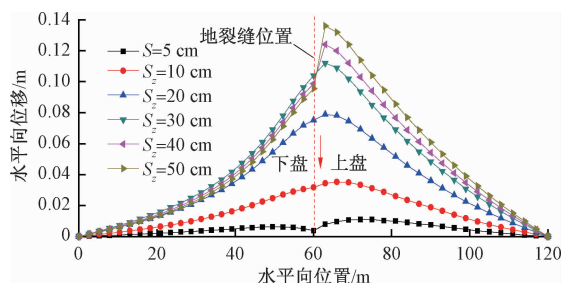


图 10 地表水平向位移变化曲线

Fig. 10 Horizontal displacement curves of ground surface

3.2 地裂缝影响区范围

根据地表相近两点的距离与差异沉降,计算得到所选断面各部位的地表平均倾斜值,由于上盘距地裂缝 30 m 和下盘距离地裂缝 20 m 范围即 $L = 50$ m 范围以外地表平均倾斜值很小,且地表竖向位移变化曲线在此范围内较为平缓(图 8),因此这部分数据不再列举。

依据《建筑地基基础设计规范》^[10],各类建筑物的地基变形允许倾斜值为安全起见取最严格的标准 2‰,以控制安全避让距离,即地裂缝上、下盘平均倾斜值超过 2‰ 的区域为地裂缝影响区范围。地裂缝不同垂直位错量 S_z 作用下地表(地基)平均倾斜值见表 2。

由表可知,地裂缝上盘地表平均倾斜值明显大于下盘。当地裂缝垂直位错量 $S_z = 5$ cm 时,地表平均倾斜值较小,未出现明显的差异沉降;当 $S_z = 10$ cm 时,上盘距离地裂缝 12 m 范围内地表平均倾斜值超过 2‰,下盘未见明显差异沉降;当 $S_z = 20$ cm 时,地表平均倾斜值大于 2‰ 的区域为上、下盘分别距地裂缝 21 m 和 10.4 m 范围内;当 $S_z = 30$ cm、40 cm 和 50 cm 时,地表(地基)平均倾斜值大于 2‰ 的区域未见明显的变化,均为上盘距离地裂缝 21 m,下盘距离地裂缝 13 m 范围内。

由此可得出,地裂缝地表影响区范围为上盘 0 ~ 21 m,下盘 0 ~ 13 m,影响区范围大小与地裂缝垂直位错量密切相关,其最大值与《西安地裂缝场地勘察与工程设计规程》^[11]中根据大量地表调查所确定的地裂缝影响区范围(上盘 20 m,下盘 12 m)较为接近,说明计算模型及结果是基本可靠的,进而也验证了规范的合理性。

表 2 地裂缝地表变形平均倾斜值(取绝对值,‰)

Table 2 Average ground deformation tilt values of ground fissure (using the absolute value, ‰)

距地裂缝 位置/m		地裂缝上盘垂直位错量 S_z /cm					
		5	10	20	30	40	50
下 盘	18.2	0.230	0.509	1.090	1.320	1.324	1.308
	15.6	0.275	0.632	1.373	1.685	1.691	1.679
	13.0	0.298	0.747	1.748	2.172	2.178	2.173
	10.4	0.325	0.904	2.209	2.841	2.843	2.848
	7.8	0.321	1.134	2.810	3.717	3.731	3.748
	5.2	0.262	1.319	3.559	4.944	4.970	5.003
	2.6	0.188	1.489	4.370	6.243	6.302	6.349
上 盘	3.0	1.948	2.693	6.171	20.675	52.403	84.580
	6.0	1.126	2.311	5.611	8.040	8.103	8.090
	9.0	1.125	2.426	4.937	6.780	6.847	6.743
	12.0	1.087	2.067	4.123	5.250	5.250	5.173
	15.0	0.853	1.832	3.267	4.050	4.007	3.923
	18.0	0.861	1.528	2.633	3.077	3.063	2.980
	21.0	0.792	1.140	2.043	2.460	2.367	2.250
	24.0	0.734	1.094	1.580	1.863	1.817	1.690
	27.0	0.684	0.909	1.297	1.470	1.380	1.260
	30.0	0.400	0.727	1.013	1.140	1.027	0.917

3.3 地层断距与埋深之间的关系

根据大量探槽和钻探揭露资料,西安地裂缝发育地段,其两侧地层多被错断,并且地层断距 D 随着埋藏深度 H 的增加和沉积年代由新到老(沉积时间的增加)逐渐增大,表现出“生长断层”的特点^[2](图 11)。地裂缝两侧地层断距一般满足关系式: $D_0 < D_1 < D_2$ 。那么地层断距究竟与埋深之间存在着什么函数关系呢?即地层断距随埋深增加的变形传递规律问题。

图 12 给出了地裂缝垂直位错量 $S_z = 30$ cm 和 50 cm 时,地层断距 D (地裂缝附近不同埋深位置处上、下盘之间的错断距离,下同)随地层埋深 H 变化曲线。由图可知,从曲线整体趋势来看,地层埋深越大,断距就越明显;也就是说,从地层深处到浅处,地层断距逐渐减小。当埋深 $H < 10$ m 时,曲线较为平缓,此时地层断距变化较小;当 $H > 10$ m 时,曲线变陡,地层断距随埋深 H 逐渐增大,而到地表则表现为地裂缝附近较大的差异沉降。

对比 $S_z = 30$ cm 和 $S_z = 50$ cm 时两条曲线,其走势基本一致,近似平行,说明断距与埋深之间存在着一种函数关系。将不同埋深情况下的断距数据进行拟合分析,可得地裂缝位错作用下地层断距(D)与埋深(H)之间关系满足:

$$D = aH^4 + bH^3 + cH^2 + dH + e \quad (3)$$

式中: D ——地裂缝附近上、下盘之间的断距/m;

H ——地层埋深/m;

a, b, c, d 和 e 为地层错断变化曲线方程的参数,且

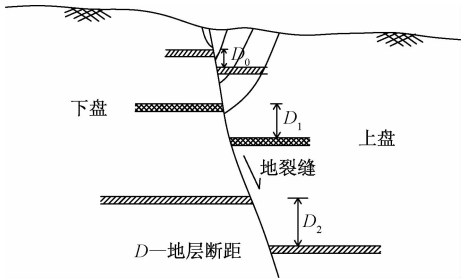


图 11 地裂缝地层错断剖面示意图
Fig. 11 Schematic profile showing the formation leap of ground fissures

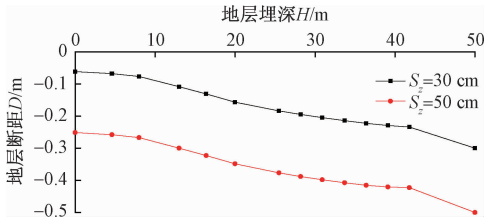


图 12 地层错断变化曲线
Fig. 12 Changes in formation leap

均为常数。

依据数值模拟计算数据,采用式(3)进行拟合,均方差 R^2 都大于 0.99,拟合精度较高。这表明在地裂缝活动作用下地层断距(D)随埋深(H)的变化满足四次多项式方程,也进一步证明地裂缝活动引起地层错动由深部到浅表部具有典型的一元四次方程式的衰减关系或变形传递规律,这种规律和关系可为地裂

缝发育地段地层剖面结构的形成机理研究提供理论依据。

3.4 地层应力变化

图 13 为剖面 $y = 5\text{ m}$ 处(图 4),在地裂缝垂直位错量 $S_z = 50\text{ cm}$ 时的地层竖向应力云图。由图可知,由于地裂缝活动(上盘相对下盘下降),造成其两侧土体一定范围内应力场重新分布:邻近地裂缝位置竖向应力表现出下盘增大、上盘减小的趋势,远离地裂缝位置竖向应力变化则较小。

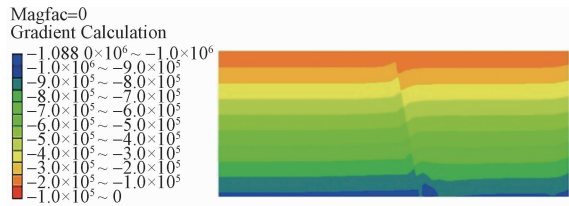


图 13 地裂缝活动引起竖向应力变化云图(单位:Pa)
Fig. 13 Vertical stress nephogram induced by active ground fissures (Unit:Pa)

为了更好地反映地层中应力大小及波动范围随埋深的变化规律,图 14 绘制出了不同埋深地层中竖向应力 σ_z 随地裂缝垂直位错量 S_z 的变化曲线。由图可知,地裂缝活动使得上盘出现明显的应力降低区,下盘出现明显的应力增强区,且上盘应力降低区范围大于下盘应力增强区;地裂缝垂直位错量越大,应力变化越明显。这一变化规律与文[6]物理模型试验所得结果基本一致。

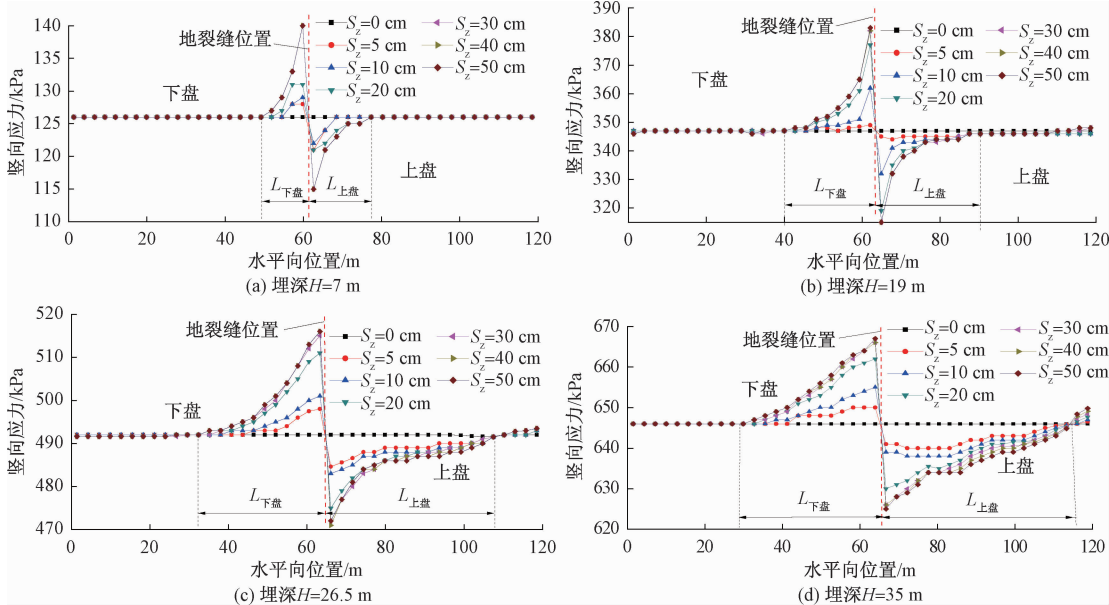


图 14 地裂缝作用下不同埋深地层竖向应力变化曲线
Fig. 14 Vertical stress change curves in different buried depth under active ground fissures

此外,从应力变化范围来看,随着地层埋深的不断 增大,上盘应力降低区和下盘应力增强区均逐渐增大,

且上盘应力降低区增长较快。若用 L_1 、 L_2 、 L_3 、 L_4 分别表示埋深 $H=7, 19, 26.5, 35$ m 的地层应力影响区,则有 $L_1 < L_2 < L_3 < L_4$,也就是说,应力变化引起的影响区范围从深部到浅部是逐渐减小的。这可用能量释放原理解释:能量从地层深处向浅处传递的过程中,传递路径越长,损耗越大。那么地裂缝活动使得地层应力变化影响区范围随埋深有什么分布规律?

从图 15 中提取出地裂缝活动作用下不同埋深地层中的下盘应力增强区 $L_{\text{下盘}}$ 、上盘应力降低区 $L_{\text{上盘}}$ 以及应力影响区范围 L (表 3),其中 L 通过式(4)得到:

$$L = L_{\text{上盘}} + L_{\text{下盘}} \quad (4)$$

为更直观地表达上述变化,图 15 绘制了地层应力影响区随埋深 H 的变化曲线。将不同埋深情况下的地层应力影响区数据进行拟合分析,可得地裂缝活动作用下地层应力影响区(L)与埋深(H)之间关系满足:

$$L = mH^3 + nH^2 + pH + q \quad (5)$$

式中: L ——地层应力影响区/m;

H ——地层埋深/m;

m 、 n 、 p 、 q 为常数。

采用式(5)进行拟合,均方差 $R^2 = 1$,拟合精度很高。这表明在地裂缝活动作用下地裂缝活动作用下地层应力影响区(L)随埋深(H)的变化满足三次多项式方程,可为地裂缝发育地段地层应力传递规律的理论研究提供重要基础和依据。

表 3 不同埋深地层应力影响区范围

Table 3 Range of the affected zones of formation stress in different depths

地层埋深 H /m	地层应力变化影响区/m		
	$L_{\text{下盘}}$	$L_{\text{上盘}}$	L
7.0	11.0	15.5	26.5
19.0	23.0	27.5	50.5
26.5	32.5	43.0	75.5
35.0	35.0	51.0	86.0

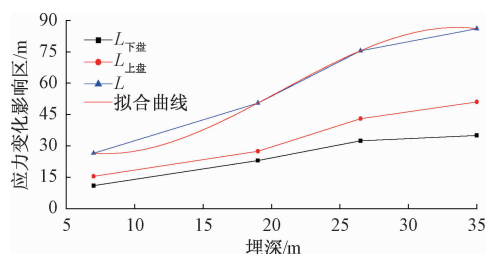


图 15 地裂缝作用下地层应力影响区随埋深变化曲线

Fig. 15 Changes in the affected zones of formation stress variation with the buried depth induced by ground fissures

图 16 给出了 $S_z = 50$ cm 时地裂缝附近主应力方向的分布,其中长轴和短轴分别代表最大和最小主应

力方向。可以看出,地裂缝活动造成其附近主应力方向均发生不同程度的偏转,即与地裂缝呈一定交角,而远离地裂缝主应力方向则逐渐与区域主应力方向一致,进一步说明地裂缝活动在其附近引起了局部应力场的改变。

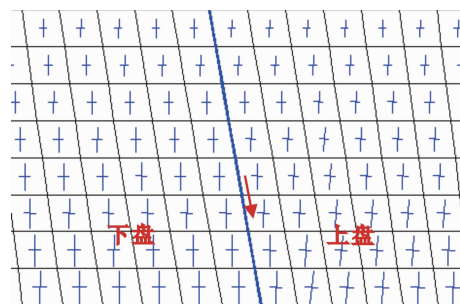


图 16 地裂缝附近主应力分布图($S_z = 50$ cm)

Fig. 16 Principal stress distribution near ground fissures ($S_z = 50$ cm)

4 结论

(1)地裂缝活动作用下,地表竖向和水平向位移均随着地裂缝垂直位错量的增大而逐渐增大。其中,竖向位移曲线近似呈反“S”形,表现出“牵引挠曲”现象;地表水平位移曲线出现明显波峰现象,且峰值点随地裂缝垂直位错量的增大而逐渐向地裂缝处靠拢。

(2)基于地裂缝活动引起的地表变形平均倾斜值,确定了地裂缝带的影响区范围为上盘 0~21 m 和下盘 0~13 m,其值大小与地裂缝活动强烈程度及垂直位错量有关。

(3)地裂缝活动引起两侧地层断距由深部到浅部逐渐减小,具有明显的变形传递衰减特征,地层断距与埋深之间的关系满足四次方程式;而地裂缝活动作用下其两侧地层应力变化范围随地层埋深的增大而增大,地层应力影响区与埋深之间关系满足三次方程式。

(4)地裂缝活动作用下,上盘出现明显应力降低区,下盘出现明显应力增强区,且上盘应力变化范围大于下盘;随着位错量的增大,上、下盘应力变化范围均逐渐增大。地裂缝附近主应力方向均发生了与地裂缝呈一定夹角的偏转,远离地裂缝主应力方向逐渐与区域主应力方向一致。

本文针对西安地裂缝活动引起上下盘地层应力和位移的变化规律和特征进行了探讨,提出了西安构造控制型地裂缝活动的一些规律性认识和看法,但关于断距随深度衰减、影响区范围随深度变化的量化关系仍需要进一步深入研究。

(下转第 164 页)

- Beijing: China Railway Publishing House, 2014 (in China)]
- [10] Groth A. Visualization of coupling in time series by order recurrence plots. [J]. Physical Review E Statistical Nonlinear & Soft Matter Physics, 2005, 72 (2): 046220.
- [11] 周全能. 软土路基后期沉降推算方法及误差分析 [J]. 岩土力学, 2007, 28(3): 512 - 516. [ZHOU Q N. On prediction method and accuracy of post-construction settlement for soft soil embankment in highway [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28 (3): 512 - 516. (in Chinese)]
- [12] Dimet F X L, Shutyaev V. Long-term predictability of mean daily temperature data [J]. Nonlinear Processes in Geophysics, 2005, 12(4): 471 - 479.
- [13] Medvinsky A B, Adamovich B V, Chakraborty A, et al. Chaos far away from the edge of chaos: A recurrence quantification analysis of plankton time series [J]. Ecological Complexity, 2015, 23: 61 - 67.

责任编辑:汪美华

(上接第 150 页)

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. [WANG J M. Theory of ground fissures hazards and application [M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 2000. (in Chinese)]
- [2] 彭建兵, 张勤, 黄强兵, 等. 西安地裂缝灾害 [M]. 北京: 科学出版社, 2012. [PENG J B, ZHANG Q, HUANG Q B, et al. Hazard of ground fissure in Xi'an [M]. Beijing: Science Press, 2012. (in Chinese)]
- [3] Leonard R J. An earth fissure in southern Arizona [J]. Journal of Geology, 1929, 37(8): 765 - 774.
- [4] Carpenter M C. Earth-fissure movements associated with fluctuations in ground-water levels near the Picacho mountains, south-central Arizona, 1980 - 1984, U. S. A Geological Survey Professional Paper [C]. Washington: United States Government Printing Office, 1993: 497.
- [5] 彭建兵, 陈立伟, 黄强兵, 等. 地裂缝破裂扩展的大型物理模拟试验研究 [J]. 地球物理学报, 2008, (6): 1826 - 1834. [PENG J B, CHEN L W, HUANG Q B, et al. Large-scale physical simulative experiment on ground-fissure expansion mechanism [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2008, (6): 1826 - 1834. (in Chinese)]
- [6] 黄强兵, 彭建兵, 闫金凯, 等. 地裂缝活动对土体应力与变形影响的试验研究 [J]. 岩土力学, 2009, 30(4): 903 - 908. [HUANG Q B, PENG J B, YAN J K, et al. Model test study of influence of ground fissure movement on stress and deformation of soil mass [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(4): 903 - 908. (in Chinese)]
- [7] 石玉玲, 门玉明, 彭建兵, 等. 西安城区地裂缝破裂扩展的数值模拟 [J]. 水文地质工程地质, 2008, 35(6): 56 - 60. [SHI Y L, MEN Y M, PENG J B, et al. Numerical simulation of ground-fissure cracking and extending in Xi'an [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2008, 35(6): 56 - 60. (in Chinese)]
- [8] 易学发, 苏刚, 王卫东. 用数值模拟研究西安地裂缝 [J]. 水文地质工程地质, 1999, 26(5): 33 - 36. [YI X F, SU G, WANG W D. Numerical simulation of Xi'an ground-fissure [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 1999, 26(5): 33 - 36. (in Chinese)]
- [9] 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 Q Y, JIANG Z W, PENG J B. Mechanism of reactivation and slip of the preexisting fault under pumping [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2013, 40(2): 108 - 112. (in Chinese)]
- [10] GB 50007—2002 建筑地基基础设计规范 [S]. 2002. [GB 50007—2002 Code for design of building foundation [S]. 2002 (in Chinese)]
- [11] DBJ61-6—2006 J10821—2006 西安地裂缝场地勘察与工程设计规程 [S]. 2006. [DBJ61-6—2006 J10821—2006 Specification for site investigation and engineering design on Xi'an ground fractures [S]. 2006. (in Chinese)]

责任编辑:汪美华