

抽水作用下先期断裂对地裂缝的影响研究*

蒋臻蔚^① 彭建兵^① 王启耀^{①②}

(^①长安大学地质工程与测绘学院 西安 710054)

(^②长安大学建筑工程学院 西安 710061)

摘要 过度抽取地下水和先期存在的断裂构造是西安市地裂缝地质灾害发生的主要原因。作者首先从理论上分析了抽水情况下地裂缝形成的张拉破裂机制、剪切破裂机制和张剪复合破裂机制,并从结构面控制理论分析了先期断裂在地裂缝形成中的控制作用;然后依据比奥三维固结理论,采用 FLAC 软件建立了西安地裂缝的计算模型,比较了抽水作用时没有先期断裂和地层差异、有先期断裂而没有地层差异、有地层差异而无先期断裂等情况时的地面变形特征,得出抽水作用下,先期断裂对地裂缝的形成及发展具有诱导、隔离和放大的耦合作用,从而得出先期断裂不仅仅只是地裂缝形成的构造基础的结论。

关键词 抽水 地裂缝 耦合作用 数值模拟

中图分类号:P642 文献标识码:A

INFLUENCE OF PRE-EXISTING FAULT ON GROUND FISSURES DURING PUMPING ACTION

JIANG Zhenwei^① PENG Jianbing^① WANG Qiyao^{①②}

(^①College of Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054)

(^②College of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061)

Abstract Ground-water depletion and pre-existing fault are the main factors that can arouse the ground fissures hazard in Xi'an City. Firstly, the tensile crack mechanism, shear crack mechanism, shear and tensile multiple mechanism of the ground fissures are analyzed in theory. The controlling role of the pre-existing fault on the causes of ground fissures is analyzed using structural plane controlling theory. Then, paper sets up a numerical simulation model with three dimension Biot's consolidation theory. Using this model, the displacements of three cases are compared. The three cases are pumping without pre-existing fault, pumping with pre-existing fault, pumping without pre-existing fault but with stratum difference. The paper finds that the pre-existing fault is not only the tectonic foundation, but also has induction, amplification and segregation functions on the formation and development of the ground fissures.

Key words Pumping, Ground fissures, Coupling, Numerical simulation, Fault

* 收稿日期: 2010-03-30; 收到修改稿日期: 2010-08-31.

基金项目: 国家自然科学基金项目(50908018), 国土资源大调查项目(121201064140).

第一作者简介: 蒋臻蔚, 主要从事工程地质方面的教学与科研工作. Email: dedgx29@chd.edu.cn

1 引言

过度抽取地下水是地裂缝形成的重要因素,这是被大多数地裂缝研究者所接受的^[1~3],但关于具体的成因机制却长期存在较大争议,很多人先后提出了不同的成因机理,归纳起来主要有渗透变形机理、土层失水收缩变形机理、渗透应力拖曳作用机理、差异沉降变形机理和刚性折裂机理等^[4]。

其中土层差异沉降变形机理得到更多的人认可,认为这是地裂缝产生的最主要的因素,其它的作用只是在某些特殊环境中起主导作用^[3,4]。但我们在西安地区的研究发现,土层中的已有破裂面,特别是延伸长、埋深大,有一定规模的先期断裂(隐伏或已经出露地表)对地裂缝的生成影响巨大^[5,6],它不仅对地裂缝的活动方式、活动量的大小有较大的影响,而且对地裂缝产生的力学机理也有影响。本文就有先期断裂情况下抽水时地面沉降引发和加剧地裂缝的机理进行了分析讨论。

2 抽水作用下地裂缝形成机理

2.1 无先期断裂面时的抽水致裂机理

地下水开采条件下土层开裂的直接原因是土层的不均匀沉降,而沉降又是土层释水后的固结变形引起的,根据太沙基有效固结原理:

$$\sigma = \sigma' + u \quad (1)$$

式中, σ 为总应力; σ' 为有效应力; u 为孔隙水压力。由上覆土层重量决定的总应力在抽水过程中保持不变,随着地下水位的下降,土中孔隙水压力降低,有效应力就会增大,从而导致含水层的压密,引起地面沉降,当沉降不均匀时,即可能在某些部位出现地裂缝。

根据裂缝出现时的具体力学机制,可分为张拉破裂机制、剪切破裂机制和张拉剪切复合机制。

张拉破裂主要是由于抽水时盆地中心、抽水漏斗中心沉降大,导致地层向中心发生移动,或地层中部基底隆起,土体向两侧移动,从而引起张拉应力,当张应力超过岩土体的抗拉强度时,即在地表产生由上而下的张拉裂缝(图1),这种地裂缝一般深度不大,地表垂直位移差异不明显。

剪切破裂主要发生在岩土体压缩性质差异显著的地方,抽水时即使两边水位下降一致,也会由于土层性质的差异产生明显的不均匀沉降,从而发生剪

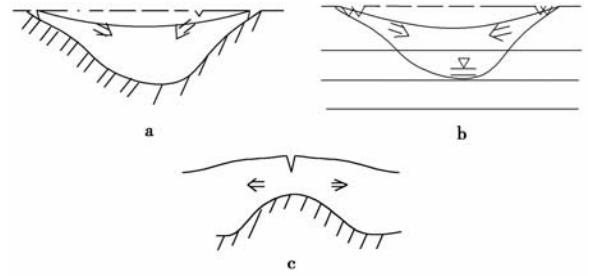


图1 张拉破裂机制

Fig. 1 Tensile crack mechanism of ground fissure

a. 沉降盆地; b. 抽水漏斗; c. 中部基底突起

切变形与破坏,裂缝自下而上向上发展,贯通到地表。裂缝发展的方向可以根据摩尔-库仑抗剪强度理论来确定。

在正常情况下,土体中最大最小主应力在水平和竖直方向为

$$\sigma_x = \sigma_3, \sigma_z = \sigma_1, \tau_{xz} = 0 \quad (2)$$

当差异沉降发生时,土体之间在竖直方向具有了相对移动,从而产生了剪应力,即 τ_{xz} 增大了,不再等于零,土体中的主应力大小和方向也随之改变,主应力方向与水平面的夹角为

$$\beta = \frac{1}{2} \arctan\left(-\frac{2\tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y}\right) \quad (3)$$

当主应力达到极限平衡时,土体即发生剪切破坏,剪切破坏面的方向与最大主应力作用面的夹角为

$$\alpha = 45^\circ + \frac{\phi}{2} \quad (4)$$

与水平面的夹角(图2)为

$$\alpha + \beta = 45^\circ + \frac{\phi}{2} + \frac{1}{2} \arctan\left(-\frac{2\tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y}\right) \quad (5)$$

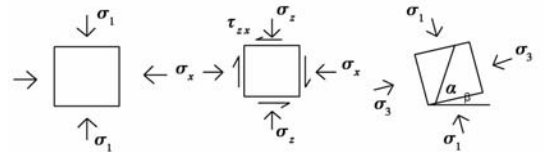


图2 土体沉降过程中应力变化及破坏面的方向

Fig. 2 Stress change during unequal land subsidence

由于土中的应力状态随着深度是变化的,所以破裂面不是平面,理论上破裂面有相互交叉的两个,但一般由于土体不会绝对均质,破裂总是沿所需能量最小的面先发生。对均质土,水位降落带内土体释水压密,沉降大的一侧土体压密更大,强度增大,因此破裂面沿沉降量小的一侧开裂和扩展。而对于上覆岩土层,在沉降向上传递的过程中,上覆土层是一个松动的过程,其强度有所降低,因此破裂面又将沿沉

降量大的一侧开裂和扩展,现场观测和我们的室内试验结果也证明了这一点^[7](图3)。

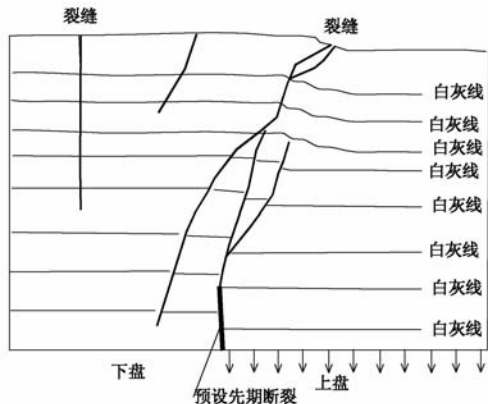


图3 破裂在上覆土层中的扩展实验结果

Fig. 3 Crack expand experiment in overlaying soil

实际上,在土体下沉过程中,上部覆土由于土拱效应,下部土体与上部土体有脱离的趋势,这时候对处于破裂面位置的土体,重力转化为一种拉力,因此使得破裂面兼具有剪切和拉张的性质,同时使得破裂面进一步向垂直于主拉应力的方向发展,在上部土体坚硬时,破裂面甚至水平发展,形成曲面断裂型地裂缝,这在表层土硬化的地段表现突出(图4)。

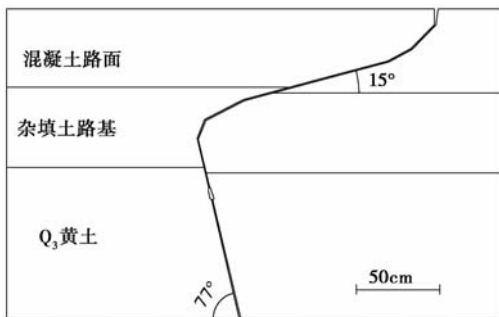


图4 西安 f11 地裂缝剖面图(交警总队院内)

Fig. 4 The f11 ground fissure in traffic corps yard

2.2 有先期断裂面时的抽水致裂机理

当地层中存在先期断裂面时,在抽水作用下,地裂缝的出现仍然有张拉破坏、剪切破坏和复合破坏这三种方式。

但由于断裂面是土体中强度明显弱化的缺陷部位,其抗拉强度为零,抗剪强度也大为降低,因此抽水后,如果地层水平移动大,则在先期断裂处,土体将首先水平张裂;而在垂直差异沉降明显时,则土体多会沿先期断裂产生滑动,同时在滑动产生的剪切力的作用下,在下沉量大的一侧土体的表层产生次级剪切裂缝或剪切拉张复合裂缝(图5),从而形

成“Y”字形的剖面形态,西安地裂缝剖面上就多表现为这种形态^[2]。

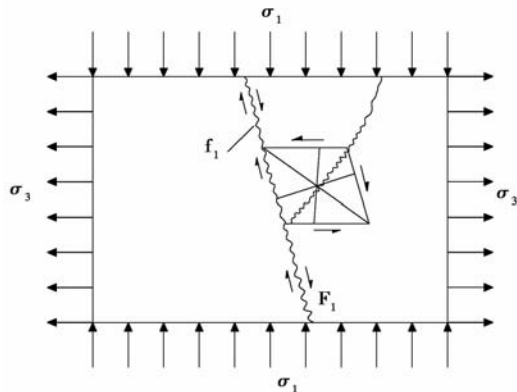


图5 差异沉降大引致次级剪切地裂缝

Fig. 5 Secondary fissure aroused by large displacement

其实,有先期断裂面时的抽水致裂机理可以用结构面控制理论来解释。和岩体中存在结构面一样,土体中也存在一些宏观的结构面^[8,9],本文中的先期断裂就是这样的典型结构面。由于结构面与周围介质性质的显著差异性,导致在环境条件发生变化时,结构面对土体的破坏起到了控制作用^[10]。因此,在过度抽取地下水,引起地面沉降时,地面首先沿先期断裂开裂形成与断裂走向一致的地裂缝,而不是在沉降漏斗边缘形成的环状地裂缝。

3 数值模拟分析

3.1 计算模型与工况

为了更好地说明抽水是如何引起地裂缝的,并定量地描述先期断裂对地裂缝产生的影响,作者对此利用FLAC软件进行了数值模拟计算。

地裂缝的产生是一个复杂的三维问题,但在垂直地裂缝的方向,可以近似的看成平面问题。地裂缝的产生与土体的水平位移有很大的关系,因此计算中对土体固结沉降的计算不能简单地采用太沙基一维固结理论,而应该采用比奥三维固结理论。

考虑到西安地裂缝的间距大致为1.5km,承压水开采层主要分布在100~300m以内,且划分为80~130m、150~170m、200~260m三个含水层,为此建立计算模型长1500m、厚300m,表层黄土厚90m,黄土以下的砂土和黏性土各三层,间隔分布。计算模型为平面应变模型,边界条件为:顶面为自由位移,自由排水边界;底部为固定位移,不排水边界;两侧边为水平固定,竖向自由,渗流边界为固定水

头。在考虑地层变化时,计算模型的一侧砂土总厚度比另一侧厚 70m;考虑先期断裂影响时在模型中央设置一倾角为 80°的接触面;考虑到三个承压水层之间有越流发生,具有统一的水位,在隔水黏土层中插入了数个砂井通道以沟通上下含水层的联系,抽水后降落漏斗水位最大降低 60m。计算工况见表 1,计算模型见图 6,土层的计算参数见表 2。

表 1 计算工况表

Tabel 1 Computation cases

工 况	地层情况	先期断裂
1	无变化	无
2	无变化	有
3	有变化	无

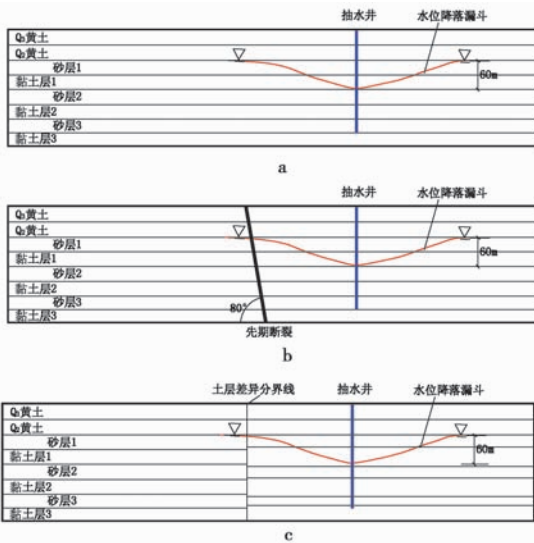


图 6 计算模型图

Fig. 6 The computational model

a. 工况 1; b. 工况 2; c. 工况 3

3.2 计算结果与分析

三种工况计算的地面沉降及地裂缝情况分别见图 7~图 9。

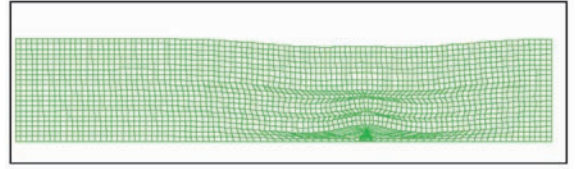


图 7 工况 1 时地面沉降变形图

Fig. 7 Land subsidence in case 1

无地层变化、无初始断裂,最大位移 3.602m

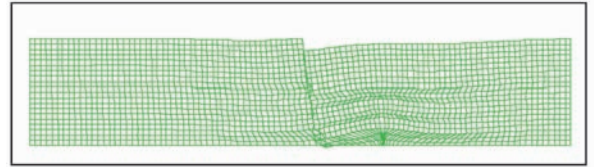


图 8 工况 2 时地面沉降及地裂缝变形图

Fig. 8 Land subsidence in case 2

无地层变化、有初始断裂,最大位移 3.907m

3.2.1 垂直沉降分析

地裂缝附近地面垂直变形情况集中于图 10,从图可见,对于均匀分布的地层,在没有先期断裂存在时,抽水形成降落漏斗后,地层的变形与水位降落漏斗一致,是渐变的;当漏斗范围内土层不均匀时,差异沉降有所增大;而当具有先期断裂面时,地面沉降出现了很大的变化,沉降在先期断裂面处出现了突变,下盘的沉降减小了,上盘的沉降增加了,并且沉降中心向断裂处转移,上盘的土体沿断裂发生了向下的滑动,这与实际测量结果的规律是一致的^[1](图 11)。鉴于地裂缝与小范围内的差异沉降关系密切,将土层突变及断裂附近地面点的差异沉降列于表 3,如果以工况 1 为标准,则差异沉降的放大倍

表 2 计算参数表

Tabel 2 Calculation parameters

土层	重度 γ /kN·m ⁻³	体积模量 K /MPa	剪切模量 G /MPa	内摩擦角 Φ	黏聚力 c /MPa	垂向渗透系数 K_z /10 ⁻⁷ cm·s ⁻¹	水平向渗透系数 K_x /10 ⁻⁷ cm·s ⁻¹	孔隙率 n
黄土 Q3	19	6.5	4.4	18	0.2	60	120	0.5
黄土 Q2	19	10.6	6.8	23	0.4	20	40	0.5
砂层 1	20	98	66	32	0	200	400	0.3
黏土层 1	19.5	12	8.2	23	0.6	15	30	0.5
砂层 2	20	98	66	32	0	200	400	0.3
黏土层 2	19.5	12	8.2	23	0.8	15	30	0.5
砂层 3	20	98	66	32	0	200	400	0.3
黏土层 3	19.5	12	8.2	23	0.8	15	30	0.5
裂缝		$K_s = 10^{-7}$ kPa·m ⁻¹					$K_n = 10^{-8}$ kPa·m ⁻¹	

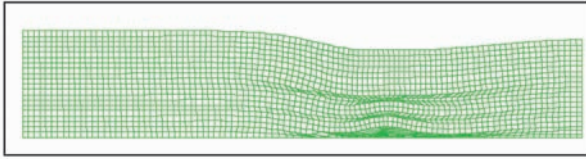


图9 工况3时地面沉降变形图

Fig. 9 Land subsidence in case 3

有地层变化、无初始断裂,最大位移4.282m

表3 各工况下土层突变及断裂附近地面点的差异沉降
 Tabel 3 Vertical displacement near the ground fissure or stratum change point

工况	1	2	3
差异沉降/m	0.099	1.554	0.312
放大倍数	1	15.70	3.15

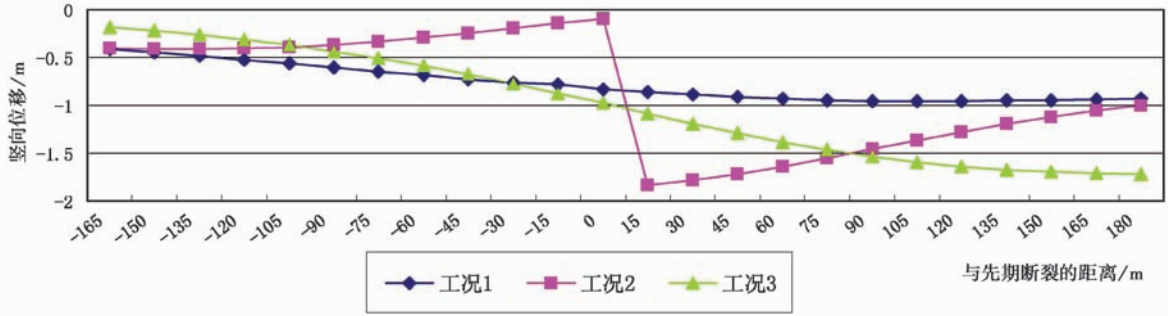


图10 各工况地裂缝附近地表沉降变形比较

Fig. 10 The vertical displacement near the ground fissure

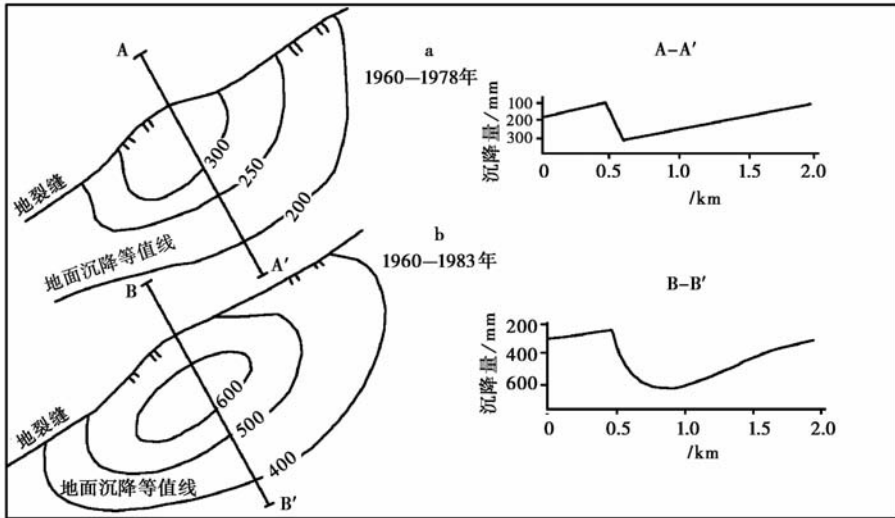


图11 西安沙坡洼地(1960~1983)地面沉降及地裂缝形态演化图(据王景明,2000^[1])

Fig. 11 Evolution diagram of land surface near the ground fissure at Shapo bottom land

in Xi'an from 1960 to 1983 (Wang Jinming, 2000^[1])

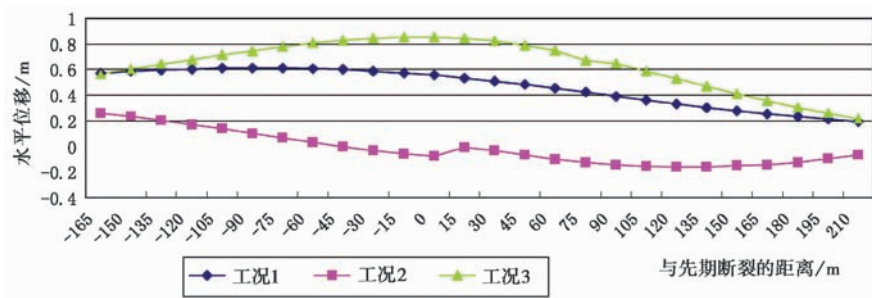


图12 各工况地裂缝附近地表水平位移比较

Fig. 12 Horizontal displacement near the ground fissure

数分别为 15.70、3.15。

3.2.2 水平位移分析

地裂缝附近地面水平位移情况集中于图 12, 从图可见对于均质土层地面水平位移都是朝向抽水井的, 位移随距离抽水井的距离而增加, 在漏斗边缘达到最大, 因此, 这种情况如果裂缝出现应该是在沉降漏斗的边缘; 而当地层发生突变时(工况 3), 最大水平位移不出现在漏斗边缘, 而是在地层突变处, 并偏于沉降大的一侧, 因此, 这种情况下如果出现张裂缝应该在土层突变处并偏于软弱土层这一侧; 在有先期地裂缝存在时, 土体的水平位移值整体减小了, 且由于地层沉降漏斗发生了向地裂缝的转移, 两侧土体均向地裂缝位置处移动, 由于整体水平位移减小, 土层中别的位置出现张裂缝的可能性降低, 裂缝集中在已有地裂缝处。

综上所述, 先期断裂的存在、土体性质的差异对地裂缝的形成和发展具有很大的影响, 并且先期断裂对地裂缝的影响最大, 比土层差异因素的影响要大的多。近期西安地裂缝的调查表明, 很多地裂缝发育的地段既不是梁洼交界区, 裂缝两侧地层组合也不存在大的变化, 但存在隐伏断层^[5, 6], 这就是先期断裂的作用引起的。先期断裂对地裂缝可以起到局部诱导、放大与隔离的作用。诱导作用指的是存在裂隙面的土体, 土体的变形最容易沿裂隙面发生, 一是张裂变形, 二是剪切错动; 放大作用指的是与没有裂隙面的情况相比较, 裂隙处的差异沉降和张开程度增大了, 本次计算中在没有地层变化的情况下, 抽水时地裂缝处的沉降被放大了 15.70 倍; 隔离作用指的是, 由于断裂的存在, 变形在地裂缝下盘大幅减小了, 以工况 2 和工况 1 比较, 下盘的沉降减小了 0.72m, 感觉就像在裂缝处施加了一个隔板, 位移的传递受到了阻隔(图 13)。

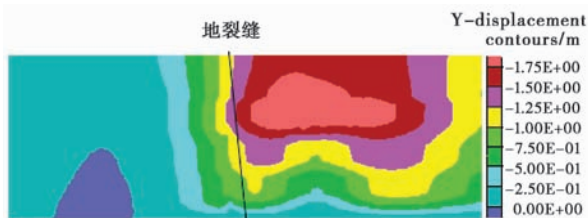


图 13 地裂缝对位移的隔离作用(垂直位移云图)

Fig. 13 Isolation function of the ground fissure

4 结 论

通过上述研究, 可以得出如下结论:

(1) 根据裂缝出现时的具体力学机制, 可分为

张拉破裂机制、剪切破裂机制和张拉剪切复合机制。先期断裂的存在对土体在抽水过程中的沉降起到了控制性的作用。

(2) 先期断裂对地裂缝具有局部诱导、放大与隔离的作用。

(3) 先期断裂对地裂缝的特殊作用均源于先期断裂的低抗拉和低抗剪强度。

参 考 文 献

- [1] 王景明著. 地裂缝及其灾害的理论与应用[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2000.
Wang Jingming. Theory of Ground Fissures Hazards and Its Application in Chinese. Xi'an: Science and Technology Press of Shaanxi, 2000.
- [2] 张家明. 西安地裂缝研究[M]. 西安: 西北大学出版社, 1990.
Zhang Jiaming. Research on Ground Fracturing in the Region of Xi'an in China. Xi'an: Northwest University Press, 1990.
- [3] 彭建兵. 渭河盆地活动断裂与地质灾害[M]. 西安: 西北大学出版社, 1992.
Peng Jianbing. Active Faults and Geologic Hazards in Wei River. Xi'an: Northwest University Press, 1992.
- [4] Sheng Zhuping, Donald C. Helm. Conceptual models for earth fissuring in Las Vegas Valley. Proceedings of the Fifth International Symposium on Land Subsidence, The Hague, October 1995. IAHS Publ, 1995, 381 ~ 387.
- [5] 李新生, 王静, 王万平. 西安地铁二号线沿线地裂缝特征、危害及对策[J]. 工程地质学报, 2007, 15(4): 464 ~ 468.
Li Xingsheng, Wang Jing, Wang Wanping. Ground fissures along Xi'an subway line 2: Characteristics, harms and measures. Journal of Engineering Geology, 2007, 15(4): 464 ~ 468.
- [6] 西安市城市快速轨道交通二号线详细勘察阶段沿线地裂缝勘察报告[R]. 长安大学工程设计研究院, 2007.
Investigation report on ground fractures along Xi'an metro line 2 at the detailed investigation stage. Engineering Design Institute, Chang'an University, 2007.
- [7] 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, 51(6): 1826 ~ 1834.
Peng Jianbing, Chen Liwei, Huang Qiangbing, et al. Large scale physical simulative experiment on ground fissure expansion mechanism. Chinese Journal of Geophysics, 2008, 51(6): 1826 ~ 1834.
- [8] 谷德振. 谷德振文集[M]. 北京: 地质出版社, 1994.
Gu Dezhen. Collected Works of Gu Dezhen[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1994.
- [9] 蒋建平, 章杨松, 罗国焜, 等. 优势结构面理论在岩土工程中的应用[J]. 水利学报, 2001, (8): 54 ~ 59.
Jiang Jianping, Zhang Yangsong, Luo Guoyu, et al. The application of preferred plane theory to geotechnical engineering practice. Journal of Hydraulic Engineering, 2001, (8): 54 ~ 59.
- [10] 蒋建平, 章杨松, 罗国焜. 基于土体中结构面的岩土工程问题探讨[J]. 工程地质学报, 2002, 10(2): 160 ~ 165.
Jiang Jianping, Zhang Yangsong, Luo Guoyu. Study on geotechnical engineering problems based on structure plane of soil mass. Journal of Engineering Geology, 2002, 10(2): 160 ~ 165.