文章编号:1673-9469(2019)04-0098-08

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2019.04.016

基底伸展型地裂缝破裂扩展的物理模拟试验研究

谢文波,马润勇*,李 焱,孙长明,尚合欣,徐一天,慕世航 (长安大学 地质工程与测绘学院,陕西 西安 710054)

摘要:基底伸展变化会引起上覆土层破裂,并导致地表建筑物、地下管线和隧道等结构物的变形 与破坏。为探究基底伸展型地裂缝的发育过程及机制,通过物理模拟试验,揭示基底拉伸情况引 起上覆土体形变和位移的变化规律,分析裂缝的剖面结构特征和发育破裂过程。结果表明,在基 底张应力环境下,断层上覆土体会被"拉裂"而释放应力。随着水平拉伸活动的持续,上覆土体 首先发生沉降和减薄,尤其是塑性较强的土体反应更明显,并在持续应力作用下,裂缝自下而上 延伸扩展,直至贯穿地表。此外,越靠近地裂缝,土体的沉降量和减薄量越大,密度越小。 关键词:地裂缝;基底伸展;物理模拟试验

中图分类号: P642.2

文献标识码: B

Physical Simulation Experiment Study on Ground-fissure Expansion Mechanism of Basement Extension

XIE Wenbo, MA Runyong^{*}, LI Yan, SUN Changming, SHANG Hexin, XU Yitian, MU Shihang (College of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an, Shanxi 710054, China)

Abstract: Changes in the basement tends to cause the overburden to rupture and deformation and damage to structures such as surface structures, underground pipelines, and tunnels. In order to explore the development process and mechanism of basement extensional ground fissures, this paper reveals the variation law of deformation and displacement of overlying soil caused by basement extension through physical simulation experiments, and analyses the section structure characteristics of fissures and the development and fracture process. The results show that under the tensile stress of the substrate, the overlying soil on the fault will be "pushed" to release stress. With the continuation of horizontal tension, the settlement and thinning of overlying soils occur first, and especially, the response of soils with strong plasticity is more obvious. Under the action of continuous stress, cracks extend from bottom to top until they penetrate the surface. In addition, the closer to the ground fissure, the larger the amount of sedimentation and thinning of the soil is, and the smaller the density becomes.

Key words: ground fissure; basement extension; physical simulation experiment

地裂缝的扩展方式和变形特征是决定工程建设 类型以及确认避让距离的关键问题之一^[1-2]。国内外 学者采用物理模拟方法针对地裂缝活动特征的研究 已有不少成果。如 Bray 和 Tani 曾用干砂进行正断层 模拟试验,结果表明当基底形变量达到上覆土层厚度 的 1% ~ 15% 时,剪切破裂即能通达地表^[3-4],其试 验同时发现,剪切破坏区域向下降盘弯曲^[5-7],郭恩 栋和冯启民等利用大型地震模拟振动台,模拟了垂 直错动的逆断层活动下土体的受力状态,并观测上 覆土体破裂的发展过程^[8-9],刘学增^[10-11]等进行了 饱和砂土体中关于逆断层传播的试验,结果发现, 在饱和砂层中断层逆冲滑动面是连续而且唯一的,

收稿日期: 2019-10-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41572264)

作者简介:谢文波 (1996-),男,陕西宝鸡人,硕士研究生,从事地质工程方面的研究。^{*}通讯作者:马润勇 (1961-),男,陕西子洲人,博士,教授,从事工程地质、地质灾害与防治方面的研究。

断层的位移速率对断层的传播有一定影响。对于土体中地裂缝的物理模拟,前人还研究了基底垂直错动引起上覆土体的开裂过程及剖面形变特征^[12-15]。从目前来看,对于基底伸展活动引起土体开裂的破裂过程以及剖面活动特征和形变特征尚缺乏补充试验观察和分析。

为此,选取涿州市伸展型地裂缝为对象,开展 基底伸展机制下地裂缝破裂扩展的物理模拟试验, 用以揭示基底伸展机制下,土体中地裂缝的破裂扩 展过程、剖面结构及土层单位厚度沉降量和减薄量 等,为地裂缝发育区工程治理和防灾减灾工作提供 依据。

1涿州市伸展型地裂缝发育特征

1.1 地裂缝平面特征

研究区地裂缝分布在涿州市中南部和东部。整体上看有很强的方向性和连续性。在村内地裂缝多呈一字型或Y字型,在农田中多以塌陷坑的形式出现。调查区内地裂缝主要分为三部分,包括刁一村地裂缝、刁四村村西北地裂缝、浮洛营村地裂缝(图1)。

刁一村地裂缝呈线型,全长约1.3 km,总体走向为EW。所经之处多为村庄房屋和农田,可见村庄房屋开裂,多呈上宽下窄的楔形,农田中以塌陷坑形态呈现,没有明显的水平和垂直位错。

刁四村裂缝位于涿州市刁窝乡刁四村村西北 900 m 处,裂缝呈线型,全长近 500 m,总体走向为 EW。所经之处多为桃树林,树林中可见大量地表裂 缝和塌陷坑,大多呈条带状,无明显的垂直错动。 其中,发现的最大地裂缝长 27 m、宽 0.8 m、深 0.1 m, 走向为 EW 向。

浮洛营村地裂缝位于涿州市码头镇浮洛营 村村北,裂缝呈线型,全长1.1km,总体走向为 NWW120°。所经之处多为村庄房屋和杨树林,在村 中可见村庄房屋开裂,多呈上宽下窄的楔形,树林 中以塌陷坑形态呈现,没有明显的水平和垂直位错。

涿州地区在构造上处于北京断凹、大兴断凹、 廊坊断凹交汇处,区内及附近分布有定县-石家庄 深断裂(F1)、大兴断裂(F2)、容城断裂(F3)三条伸展 断裂(如图1),这些伸展断层共同构成了此区域的 伸展构造环境。在断层伸展构造环境中,坳陷内部 水平伸展量和垂直伸展量并不均一,伸展量大的部 位往往发育在控坳边界断层附近,多条伸展断层的 叠加,使此区域的拉张应力场大于临近区域,构成 了地裂缝的发育区^[16-18]。

1.2 地裂缝剖面特征

据探槽显示(图2),地裂缝向地表呈开口状张 开,向深部逐渐闭合。从裂缝的产状性质来看,地 裂缝产状近于直立,倾向不明显,上下两盘未形成 明显错动。裂缝宽度上宽下窄,边界呈不规则的楔形,



Fig.1 Distribution map of the ground fissures in Zhuozhou



Fig.2 The Wei Zhuangtou village trench profile

至探槽底部逐渐闭合。据产状性质,可以推断地裂 缝活动由拉张作用形成,垂直活动不明显。

2 物理模拟试验方法

2.1 试验装置与原理

模型箱的三维结构如图 3,模型箱内部尺寸设 计为 2.5 m×1.2 m×1.5 m。拉伸量由两个平行固 定的水平剪力式千斤顶控制。四个千斤顶安放在移 动盘支板底部,用来提供支板的竖直支撑,移动盘 与支板之间通过 3 根滚杠相接,最大水平拉伸量为 5 cm。模型箱侧壁为三块钢化玻璃,可以观察裂缝 剖面发育情况。模型如图 4。

为模拟基底拉升导致上覆土体减薄拉裂的破裂 扩展机制,本次试验模型A盘不动,B盘水平拉伸, 人为控制模型箱底板的水平拉伸量,以便观察裂缝



图 5 风短模型相反口图 Fig.3 Experimental model box design



图 4 实验模型箱实际图 Fig.4 Schematic diagram of the experimental model box

发育的剖面特征。

2.2 模型设置及土层参数

本次试验的主要材料为粉土和硅酸凝胶(SiO₂ ·nH₂O,见图5)。底部长2.5m,宽1.2m,填土高 0.55m。土层剖面如图6所示。为揭示模拟基底断 层伸展引起上覆土体破裂过程及机制,将硅酸凝胶 与粉土以互层形式堆建。每隔15cm土铺设一层硅 胶,共铺垫两层,每层厚5cm。室温下,硅酸凝胶 密度为1.69g/cm³,土层的物理力学参数如下表1。

2.3 模拟实验步骤

①标注刻度并在玻璃内表面涂抹凡士林。模型箱制作完成后,首先将模型箱侧壁剖面(玻璃面)以预设裂缝为中心,划分为0.5 cm×0.5 cm的网格。然后在B盘(移动盘)底部标记拉伸刻度, 共 5 cm。然后在玻璃内表面均匀涂抹一层较薄的凡 士林,用以减少土体和玻璃之间的摩擦。②填土并 铺设标志层(白灰)。进行土体填筑过程中,尽可 能控制土层密度和变形模量与实际地层相近。每填 筑 5 cm 进行整平并铺设白灰,每填筑 5 cm 进行整 平并铺设白灰,每填筑 5 cm 进行压实。分层碾压保 证土体压实均一。铺设白灰作为标志层,以备试验 完毕进行剖面观察。③底板水平拉伸并记录数据。 模型填筑完成,静置 24 h 后,进行底板水平拉伸。

| 表 ¹ 不同深度土体物理力学参数 | | | | | | | |
|-------------------------------|---------------------------------------|---|--|--|--|--|--|
| Tab.1 Physical and mechanical | parameters of soil at different depth | S | | | | | |

| 深度 /cm | 材料 | 重度 /(kN·cm ⁻³) | 弹性模量 /MPa | 泊松比 | 内聚力/kPa | 内摩擦角/° |
|---------|------|----------------------------|-----------|------|---------|--------|
| 0 ~ 15 | 粉土 | 14.5 | 3.5 | 0.21 | 7.63 | 31.4 |
| 15 ~ 20 | 硅酸凝胶 | 16.6 | | 0.17 | 10 | 17 |
| 20 ~ 35 | 粉土 | 15.0 | 4 | 0.21 | 8.56 | 28.6 |
| 35 ~ 40 | 硅酸凝胶 | 16.6 | | 0.17 | 10 | 17 |
| 40 ~ 55 | 粉土 | 15.8 | 4 | 0.23 | 8.78 | 31.7 |



图 5 硅酸凝胶 Fig.5 type silica gel

| 粉土 ρ =1.48 g/cm ³ | $h_1=15$ cm |
|--|------------------------------|
| 硅酸凝胶 ρ=1.69 g/cm ³ //////////////////////////////////// | $/////h_2=5 \text{ cm}$ |
| 粉土 ρ =1.53 g/cm ³ | <i>h</i> ₃ =15 cm |
| 硅酸凝胶 ρ=1.69 g/cm ³ //////////////////////////////////// | $///// h_2 = 5 \text{ cm}$ |
| 粉土 p=1.61 g/cm ³ | <i>h</i> ₅ =15 cm |
| | 固定盘 |

图 6 模型地层剖面 Fig.6 Model stratigraphic section

每天缓慢拉伸 0.5 cm, 分 4 次进行, 每次 0.1 ~ 0.2 cm, 稳定 8 ~ 12 小时后, 对模型剖面特征进行 观测并记录数据。本次试验共拉伸 5 cm。④数据分 析处理。

3 试验结果及分析

3.1 基底伸展型地裂缝的发育过程

经过试验观察分析,基底伸展型裂缝的扩展大 致经历了初始土体底部破裂阶段、加速破裂到地表阶 段和次级裂缝发育阶段三个阶段,如图 7。

3.1.1 初始土体底部破裂阶段

对应于拉伸量为0~0.5 cm。F₁ 裂缝开始出现 在模型土体底部,由预设裂缝向上发育,破裂面倾 向移动盘,倾角25°~35°,高度12.3 cm,未发展 至地表。移动盘下层硅胶处发育细小的裂隙,越靠 近裂缝位置,裂隙越发育。

3.1.2 加速破裂到地表阶段

对应于拉伸量为 0.5 ~ 2.0 cm。随着拉伸量不 断增大, F₁ 裂缝向上加速发育,破裂面依旧倾向移 动盘,倾角变陡为 70°~ 80°。在发育到近地表时, 裂缝转折倾向固定盘发育,直到地表。裂缝左侧上 层硅胶处同样发育细小裂隙。 3.1.3 次级裂缝发育阶段

对应于拉伸量为 2.0 ~ 5.0 cm。在拉伸量为 2.5 cm 时,地面 F_1 裂缝的右侧出现第一条次级裂缝 F_2 ,距 F_1 裂缝 11.3 cm。由上而下平行 F_1 发育。在 拉伸量为 3.5 cm 时, F_2 裂缝的右侧出现第二条次级 裂缝 F_3 ,距 F_1 裂缝 34.3 cm,由上而下垂直发育。 随着拉伸量的不断增大, F_2 、 F_3 裂缝不断向下发育,裂缝左侧移动盘内部拉张裂隙增多。

地裂缝破裂扩展的过程中(图8),当基底拉伸 量达到2cm后,F₁裂缝从基底破裂扩展至地表, 土体③与土体②逐渐相脱离,土体②受左侧临空面 影响,顶部呈受拉状态而产生了F₂、F₃裂缝,这与 赵其华等^[19]提出的重力机制产生次级裂缝的理论 相符。随着基底拉伸量继续增大,土体②应力重新 分布并达到平衡,此时F₂、F₃裂缝的宽度和深度也 基本增至极大值,而当基底拉伸量再继续增大时, F₂、F₃裂缝的宽度和深度不会发生大的变化,但F₁ 裂缝却会随之变宽。

3.2 地裂缝剖面破裂特征分析

从模型剖面素描图看,如图 7(f)。从整个剖面 来看,裂缝主要由三部分组成:主裂缝 F1、次级裂 缝 F2 和 F3、移动盘中部细小裂缝。

主裂缝 F₁两壁粗糙曲折,张开度大,中间有明 显的破碎带和松散填充物。填充高度为 24.3 cm,有 明显的拉张型裂缝的特征。主裂缝 F₁ 由下而上倾斜 发展,在模型底部为倾角 25°~35°,中部为 70° ~80°,裂缝倾向移动盘。在裂缝发育到地表附近 时发生分叉,有明显的破碎带,呈 Y 字型,这与近 地表裂缝形态一致。主裂缝 F₁ 的张开随着基底拉伸 量的不断增大而增大,如图 9。基底拉伸 5 cm 时, 表部最大张开度为 2.6 cm,向下裂缝张开度逐渐变 大。主裂缝 F₁ 剖面呈上窄下宽形态,中部土体松散。 裂缝中下部 (35 cm 以下),破碎带明显。随着次级 裂缝 F₂ 的出现, F₂ 裂缝与 F₁ 裂缝之间的破碎带有 加剧的趋势。

次级裂缝 F₂ 由土体表面开始,倾斜向下发展, 距主裂缝 F₁11.3 cm,深度 11.2 cm。裂缝呈上宽下 窄的形态。裂缝两壁粗糙不平,张开度较小,表部 最大张开度为 1.8 cm,深度到 8.5 cm 时,张开度迅 速减小直到闭合,无松散填充物,表明次级裂缝 F₂ 同样为拉张性裂缝。

次级裂缝 F3 发育最迟,也发育最缓慢。由土体

表面开始,直立向下发展,距主裂缝 F134.3 cm,呈 上宽下窄的形态,最深达 8.3 cm。裂缝张开度小, 表部最大张开度为0.5 cm。无松散填充物,属于拉 张型裂缝。

从模型的整体剖面发育特点来看,三条裂缝都 属于拉张型地裂缝,平行展布,主裂缝 F1 向移动盘 倾斜并向上发展,次级裂缝 F2、F3 由地表向下发展。 主裂缝 F1 与次级裂缝 F2 剖面呈 Y 字形分布。除此



(a) s=0.5 cm 剖面实际照片



20

30-

40-

50--

之外还发现,移动盘的硅胶层附近有许多细小的拉 张裂缝,且下层硅胶附近较多。这些裂缝平行于 F1 裂缝向两头发育,长度和张开度较小,且并未发展 至地表。

对模型不同位置土体进行取样,用环刀采集土 样并测定密度。在水平位置-105 cm 到 30 cm(以预 设裂缝为中心,移动盘为负,固定盘为正)的区域 内对土体取样。水平方向同一深度每隔 15 cm 取一



深度/cr 10-

> 移动盘 比例尺 0 10cm 预设裂缝 固定盘 (f) s=5.0 cm 剖面素描图 图 7 不同拉伸量 s 土体剖面实际照片和素描图

Fig.7 Photos and sketches of soil profiles with different tensile amount s



图 ⁶ *杂继*扩展过程间 汤图 Fig.8 Simple diagram of crack propagation process



图 9 主裂缝 F₁ 张开度随基底断层拉伸的变化关系 Fig.9 The curve of crack F₁ opening degree with substrate stretching



个样,共取10个,竖直方向共取4个深度(10 cm、 25 cm、35 cm、45 cm),取样位置如图7(f)。结果如 表2,绘制趋势曲线如图10。

由图 10 可以看出,越靠近主裂缝,土体的密度 越小。移动盘土体密度整体小于固定盘土体密度, 且移动盘相邻土体密度差异较大,固定盘较为平稳。 对比图 7 中土样的位置,相同埋深下,移动盘有细 小裂隙发育的位置,土体密度要小于附近其他位置。 表明,裂缝的发育会造成土体密度不同程度的减小, 使土体更易受到降雨、地下水和地震的影响,从而 加速裂缝的发育。

监测不同深度地层(深度分别为-5 cm、-15 cm、-25 cm、-35 cm)的沉降变形随底部拉伸量的变化情况,如图 11 所示(以预设裂缝为中心,移动盘为负,固定盘为正)。

从水平方向来看,土体的沉降量固定盘小于移 动盘,且固定盘沉降量较平稳,移动盘相邻点沉降 量差异较大,尤其是硅胶层附近。靠近主裂缝位置, 土体沉降量逐渐增大,形成缓坡,主裂缝位置的沉 降量达到最大值。这是由于主裂缝 F1处形成临空面, 在重力挤压作用下,临空面侧土体没有侧向应力的 约束,垂向形变逐渐增大,形成缓坡。这也表明, 在降雨和地下水作用下,渗流力作用在裂缝处缓坡 上时,易形成塌陷坑和沉降漏斗,这也与野外调查 结果一致。

从竖直方向来看,上覆土体的沉降量会随基底 拉伸量的增大而增大。在拉伸为1 cm 时,各深度土 体的沉降量变化较小,这是由于此时基底拉伸量较 小,主裂缝 F₁ 只在土体底部有微小的发育,并未发 展至上层土体。因此,对土体沉降变形影响较小。 随着基底拉伸量不断增大,主裂缝迅速发展至地表, 形成贯通裂缝。同时,土体的沉降变形也逐渐增大, 尤其是在基底拉伸量由1 cm 增大到3 cm 时,沉降 变形的增大尤为迅速。

将土体由上至下,每5 cm 为一层,划分为8 层 (第4 层和第8 层为硅胶层,底部三层土体形变极小, 所以未纳入统计)。分别计算每层土体的减薄量(减 薄量 = 上表面沉降量 - 下表面沉降量)。统计土体拉 伸 5 cm 时各层土体的减薄量如图 12。

由图 12 知,移动盘的减薄量大于固定盘,且移动盘相邻点减薄量差异较大,而固定盘较平稳。越靠近主裂缝位置,土层减薄量越大。第5层土体,水平位置-40 cm 至0这段中,减薄量出现负值。这

是因为主裂缝 F₁ 在第5层土体处发生较大曲折,在 向下沉降的过程中,上层(第4层硅胶层)裂缝边 缘被支撑,而下层土体继续向下沉降,第5层土体 被垂直拉伸,所以出现一段负值现象。总体来看, 土体减薄量符合剖面的裂缝分布,减薄量较大的地 层附近,裂缝较发育。这是由于在基底拉伸过程中, 土体体积不变,形状拉长变薄,造成了土体中应力 集中的现象,减薄量大的地方集中应力相对较大, 所以土体从减薄量较大的地方开裂。

总之,由以上数据不难看出,当基底伸展活动

时,上覆土体会随着水平拉伸活动发生较大的沉降 和减薄。同时,距离地裂缝的距离不一样,其沉降 量、减薄量和密度也不一样,越靠近地裂缝,土体 的沉降量和减薄量就越大,密度越小。这种减薄现 象还会引发土体内部形成细小的拉张裂缝,这些裂 缝开裂应力释放之后,没有力的作用,裂缝发育停 止,所以并未发展至地表。土体内部细小裂缝会使 土体密度减小、松散,易受到水作用的影响。所以 在实际工程中,对于地裂缝形变的影响,不仅要观 察地表的变形情况,还要注重土体内部的裂缝分布,

| | 表2 不同深度土体密度(単位:g・cm ⁻³) | |
|-------|--|---------|
| Tab.2 | The soil density at different depth (unit: | g·cm⁻³) |

| 深度 /cm | | | | | 位置 | /cm | | | | |
|--------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | -105 | -90 | -75 | -60 | -45 | -30 | -15 | 0 | 15 | 30 |
| 10 | 1.50 | 1.23 | 1.21 | 1.19 | 1.39 | 1.44 | 1.17 | 1.45 | 1.44 | 1.45 |
| 25 | 1.48 | 1.56 | 1.47 | 1.41 | 1.41 | 1.46 | 1.51 | 1.56 | 1.57 | 1.57 |
| 35 | 1.51 | 1.57 | 1.50 | 1.45 | 1.43 | 1.48 | 1.58 | 1.59 | 1.59 | 1.58 |
| 45 | 1.43 | 1.59 | 1.40 | 1.53 | 1.51 | 1.49 | 1.53 | 1.58 | 1.60 | 1.60 |



图 11 不同深度地层沉降变形曲线

Fig.11 The stratum settlement deformation curves at different depth



Fig.12 The variation curve of soil thickness reduction at different depth

从而制定一个合理的安全避让距离,减小地裂缝对 建筑物的影响。

4 结论

1) 从整个剖面看,裂缝由三部分组成:主裂缝
 F₁、次级裂缝 F₂和 F₃、移动盘中部细小裂缝。

2) 裂缝的剖面形态呈Y字形。次级裂缝F₂倾斜向下发育,次级裂缝F₃垂直向下发育,两侧无明显破碎带。主裂缝F₁由预设裂缝向上倾斜发展,破裂面倾向移动盘,带内土体拉张变形严重,地表附近裂缝呈Y字形状。

3)距离主裂缝的距离不一样,其沉降量、减薄量、 密度也不一样,越靠近主裂缝,土体的沉降量和减 薄量就越大,密度反而越小。

4) 裂缝扩展经历了三个阶段:初始土体底部破裂阶段,加速破裂到地表阶段,次级裂缝发育阶段。

参考文献:

- [1] 徐泽龙. 逆断层错动引起上覆土层破裂的模型试验研究 [D]. 杭州:浙江大学, 2015.
- [2] 宋彦辉,李忠生. 地裂缝活动对两侧土体性质的影响 [J]. 土木建筑与环境工程, 2012, 34(Z1): 200-204.
- [3]BRAY J D, SEED R B, SEED H B.Analysis of Earthquake Fault rupture Propagation through Cohesive Soil[J].Journal of Geotechnical Engineering, 1994, 120(3); 562-580.
- [4]BRAY J D, SEED R B, CLUFF L S, et al.Earthquake Fault Rupture Propagation through Soil[J].Journal of

Geotechnical Engineering, 1994, 120(3): 543-561.

- [5]TANI K.Proposal of Ground Improvement Method to Prevent Fault Rupture Hazard[J].Proc.of the 11th ICSDEE and the 3rd ICEGE (D.Doolin, A.Kammerer, T.Nogami, RB Seed, I.Towhata, Eds.), 2004: 590-597.
- [6]TANI K.Scale Effect of Quaternary Ground Deformation Observed in Model Tests of Vertical Fault[C]//Proceeding of 29 th Japan National Conference on SMFE, 1994.
- [7]TANI K, UETA K, ONIZUKA N.Discussion of "Earthquake Fault Rupture Propagation through Soil" by Kazuo Tani, Keiichi Ueta, and Nobuhiro Onizuka[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 122(1): 80-82.
- [8] 郭恩栋,冯启民,薄景山,等.覆盖土层场地地震断裂实验[J].地震工程与工程振动,2001(3):145-149.
- [9] 郭恩栋, 邵广彪, 薄景山, 等. 覆盖土层场地地震断 裂反应分析方法 [J]. 地震工程与工程振动, 2002(5): 122-126.
- [10] 刘学增, 滨田政则. 活断层破坏在土体中传播的试验 研究 [J]. 岩土工程学报, 2004(3): 425-427
- [11] 刘学增,朱合华.断层在土体中的传播模式及对地下 管线的影响[J].力学与实践,2004(5):7-13.
- [12] 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.
- [13] 石玉玲. 地裂缝作用下桥梁与房屋基础灾变机理模型 试验研究 [D]. 西安:长安大学,2011.
- [14]张云峰,赵旭光,王宇,等.正断层伴生裂缝物理 模拟实验研究[J].科学技术与工程,2010,10(36): 8975-8979.
- [15] 胡志平,彭建兵,黄强兵,等.地铁盾构隧道 30°斜 穿地裂缝的物理模拟试验 [J].长安大学学报:自然科 学版,2009,29(4):63-68.
- [16] 杨明慧,刘池阳,杨斌谊.冀中坳陷中生代构造变形的转换及油气[J].大地构造与成矿学,2001(2):113-119.
- [17] 杨明慧,刘池阳,孙冬胜,等.冀中坳陷的伸展构造
 系统及其构造背景 [J].大地构造与成矿学,2002(2):
 113-120.
- [18] 杨明慧,刘池阳,杨斌谊,等.冀中坳陷古近纪的伸展构造[J].地质论评,2002(1):58-67.
- [19] 赵其华,王兰生,构造重力扩展机制的地质力学模拟 研究 [J]. 工程地质学报,1995(1):21-27