

# 西安出露及隐伏地裂缝与地铁隧道相互作用数值模拟分析<sup>\*</sup>

袁立群<sup>1,2</sup>, 门玉明<sup>1</sup>, 刘洪佳<sup>1</sup>, 刘 蕾<sup>1</sup>

(1. 长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054; 2. 鲁东大学 土木工程学院, 山东 烟台 264010)

**摘 要:** 随着西安地铁工程的开展, 西安地裂缝对地铁的影响成了亟需解决的重大科学问题。为了更好地反映实际情况, 并与出露地裂缝工况下大型物理模型试验对比, 建立了穿越出露及隐伏地裂缝两种工况的地铁盾构隧道数值计算模型, 并将二者的计算结果进行对比分析。结果表明: 隐伏地裂缝影响带比出露地裂缝的影响带的范围及深度都要大得多; 出露地裂缝模型边侧地表土体竖向位移主要是由于上下盘土体之间的摩擦产生的, 而隐伏地裂缝模型是由于地裂缝上盘土体发生沉降, 导致其上覆土体产生变形, 边侧地表土体的竖向位移为上下盘土体之间的摩擦及上覆地层的变形导致; 出露地裂缝与隐伏地裂缝活动作用下盾构衬砌拱底竖向位移曲线均为“S”形曲线, 出露地裂缝活动作用下盾构衬砌变形程度较隐伏地裂缝工况要大。

**关键词:** 地裂缝; 地铁隧道; 竖向位移; 相互作用; 西安

**中图分类号:** P642.26; TU354 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2013)02-0011-04

## 0 引言

由于自然和人为等因素的作用和影响, 自1950年代末期以来, 西安市区先后出现了14条地裂缝, 致使不少地面建筑物和地下设施遭受破坏, 迄今为止已造成40亿元的直接经济损失。

随着西安地铁工程的开展, 西安地裂缝对地铁的影响成了亟需解决的重大科学问题。近年来, 彭建兵<sup>[1]</sup>、黄强兵<sup>[2-3]</sup>、范文<sup>[4]</sup>、胡志平<sup>[5]</sup>等围绕西安地铁工程穿越地裂缝的结构措施开展了较深入的研究。但是由于这一问题的复杂性, 仍有许多工作要做<sup>[6]</sup>。为了更好地反映实际情况, 并与出露地裂缝工况下大型物理模型试验对比, 本文建立了穿越出露及隐伏地裂缝两种工况的地铁盾构隧道数值计算模型, 并将二者的计算结果进行对比分析。

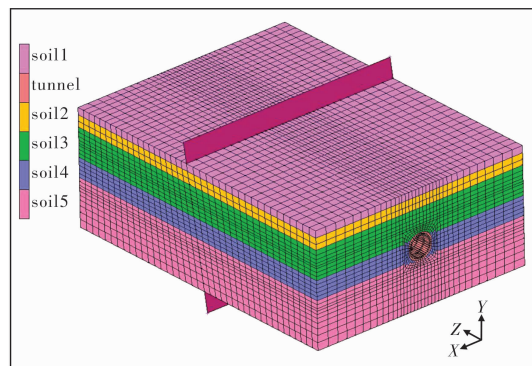
## 1 模型建立

### 1.1 模型尺寸

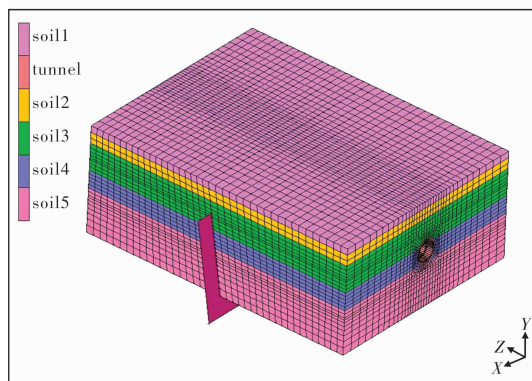
为了能与已完成的物理模型试验进行对比, 本文有限元盾构衬砌模型尺寸与物理模型试验一致, 但为了消除有限元计算中存在边界效应适当扩大了地层的边界, 以及为了消除网格划分畸形带来的计算不收敛问题, 因此扩大模型纵向长度来消除边界效应的影响。

以地铁隧道90°正交穿越地裂缝工况为例, 物理模型试验尺寸: 长×宽×高=10 m×8 m×4 m, 出露地裂缝有限元模型尺寸: 长×宽×高=16 m×12 m×6 m, 即纵向地层和隧道长度为10 m, 地层横向宽度为12 m, 地层埋深为6 m, 隧道衬砌底部

埋深取3.5 m, 地裂缝倾角按80°来布设, 有限元计算模型如图1所示。



(a) 出露地裂缝活动环境



(b) 隐伏地裂缝活动环境

图1 90°工况有限元计算模型

隐伏地裂缝有限元模型除上部1.5 m处合并上下盘公共节点按整体地层来考虑外, 其余尺寸及建

\* 收稿日期: 2012-10-26 修回日期: 2012-12-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(41172257)

作者简介: 袁立群(1981-), 男, 山东阳谷人, 博士研究生, 讲师, 主要从事岩土工程及建筑安全工程研究。

E-mail: Liqunyan@163.com

表 1 有限元模型材料参数

材料	重度 $\gamma/(\text{KN}/\text{m}^3)$	弹性模量 $E/\text{MPa}$	泊松比 $\mu$	粘聚力 $C/\text{kPa}$	内摩擦 角 $\phi/(^{\circ})$	埋深/ m
①杂填土( $Q_4^{ml}$ )	17.3	1.20	0.35	16	11°	0.4
②黄土( $Q_4^{al}$ )	18.6	3.5	0.35	24	19°	1.0
③黄土( $Q_3^{col}$ )	19.2	4.0	0.30	30	21°	2.7
④古土壤( $Q_3^{el}$ )	19.6	4.5	0.32	35	23°	3.4
⑤黄土( $Q_2^{col}$ )	19.6	8.0	0.33	40	26°	6
钢筋混凝土结构	25.0	$23.2 \times 10^3$	0.18	$2.2 \times 10^3$	55°	3.5

模步骤与出露地裂缝有限元模型建立相同。对于地裂缝上下盘之间、土体与衬砌之间均按接触关系来考虑,采用库仑摩擦模型。上盘土体与下盘土体之间摩擦系数为 0.2,上下盘土体与隧道衬砌之间摩擦系数为 0.7。

### 1.2 模型材料

数值计算模型中所采用的材料详细参数见表 1。

### 1.3 监测点位置

在有限元模型中布置 5 道测线,分别为模型边侧地表 A 测线、衬砌拱顶地表 B 测线、衬砌拱顶土体 C 测线、衬砌拱底土体 D 测线及衬砌拱底 E 测线,具体测线布置见图 2。

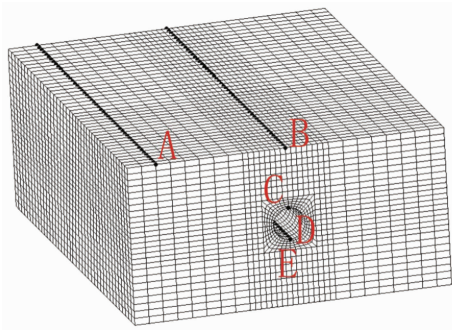
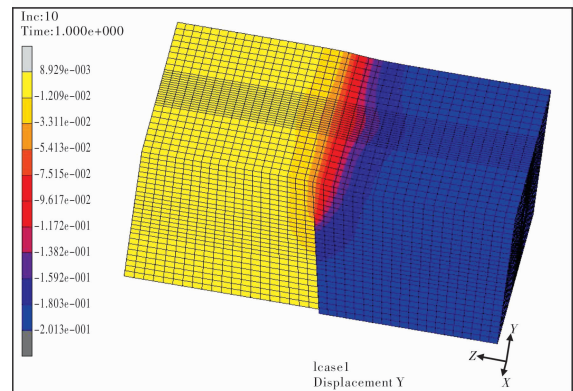
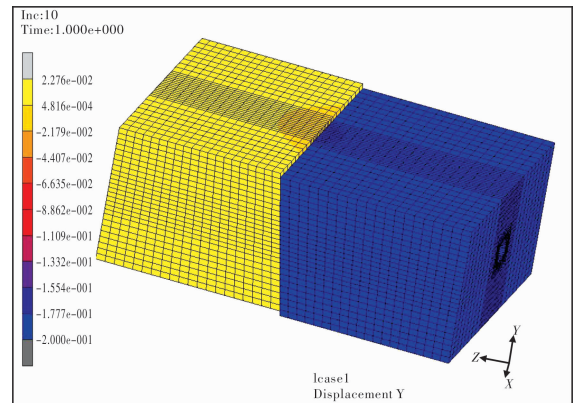


图 2 测线布置图

图 3 出露地裂缝(上)与隐伏地裂缝(下)  
地层竖向位移云图(20 cm)

## 2 有限元计算结果分析

### 2.1 竖向变形分析

通过出露地裂缝活动作用下正交工况地层竖向位移云图(20 cm)与隐伏地裂缝活动作用下正交工况地层竖向位移云图(20 cm)(图 3)对比,可以看出这两种地裂缝活动过程中由于上下盘地层及盾构隧道结构的影响均会造成地表的变形。因此,在实际工程上既要避免将建筑物直接建于地裂缝之上,又要避开地裂缝两侧的地层形变带,这个不适宜进行建筑的范围即称为地裂缝的影响带。从图 3 来看,出露地裂缝有限元模型中地裂缝的影响带主要集中于盾构隧道拱顶地表。而对于隐伏地裂缝模型,在地裂缝两侧出现明显地层影响带,这个影响带范围比出露地裂缝情况下的地表变形影响带范围及深度大得多。

### 2.2 位移分析

对于出露地裂缝活动对盾构隧道衬砌作用与隐伏地裂缝对盾构隧道衬砌作用的差异性研究,

主要通过有限元模型中不同位置处的位移进行比较分析。图 4 中的 a、b 分别给出了出露地裂缝情况下和隐伏地裂缝情况下的地裂缝位错量达到 20 cm 时的 A、B、C、D、E 5 道测线的竖向位移变化曲线。分别对出露地裂缝有限元模型及隐伏地裂缝模型中的相应测点的竖向位移变化进行分析。

#### (1) 地表竖向位移对比分析

地裂缝的地表变形主要由盾构结构对土体作用及上下盘地层之间的摩擦产生。取图 4 中的出露地裂缝模型与隐伏地裂缝模型拱顶地表竖向位移曲线单独进行对比可以发现,地裂缝是否出露对地表变形有较大影响。

从图 5 可以看出,出露有限元模型上盘土体与下盘土体表面的竖向位移较小,但上下盘地层之间存在明显的由地裂缝上盘沉降而产生的错台。而对隐伏地裂缝有限元模型来说,其上盘与下盘地表之间没有明显的错台,但上盘土体与下盘土

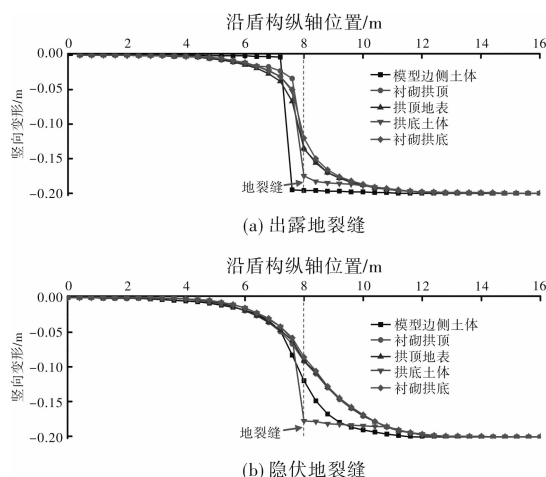


图4 90°工况模型测线5竖向位移曲线

体表面的竖向位移均较大。从地表竖向位移来看, 出露地裂缝对地表建筑的危害较隐伏地裂缝要小。

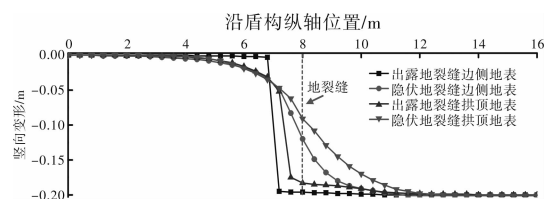


图5 90°工况出露模型与隐伏模型拱顶地表及边侧地表竖向位移曲线对比(20 cm)

将两种工况的盾构隧道拱顶地表及边侧地表土体竖向位移曲线对比, 可以发现: 对于出露地裂缝模型, 其拱顶地表竖向位移较边侧地表土体竖向位移量要大, 边侧地表土体竖向位移主要是由于上下盘土体之间的摩擦产生的, 拱顶地表竖向位移除了受上下盘土体之间的相互摩擦影响外, 还存在结构对地表竖向位移的影响。从图5中可以看出, 结构对地表竖向位移影响比上下盘土体之间的摩擦产生的竖向位移要大。

对于隐伏地裂缝模型, 由于地裂缝上盘土体发生沉降, 导致其上覆土体产生变形。其边侧地表土体的竖向位移为上下盘土体之间的摩擦及上覆地层的变形导致。由于盾构隧道对地层存在抑制拱顶土体竖向位移的作用, 因此其拱顶地表的竖向位移较边侧地表土体的竖向位移要小。

## (2) 盾构隧道衬砌变形对比分析

图6为正交工况下出露地裂缝与隐伏地裂缝活动作用下盾构衬砌拱底竖向位移曲线图, 两条竖向位移曲线形状相似, 均为“S”形曲线, 但出露地裂缝活动作用下的盾构衬砌竖向位移曲线较隐伏地裂缝活动作用下盾构衬砌拱底竖向位移曲线要陡, 由此可以推论出露地裂缝活动作用下盾构衬砌变形程度较隐伏地裂缝工况要大。

出现这种情况的原因, 由于隐伏地裂缝模型中存在未被地裂缝贯穿的上覆土体, 隐伏地裂缝活动作用下盾构隧道其上覆完整土层在下伏地裂缝沉降影响下发生运动, 但上覆土体之间存在一

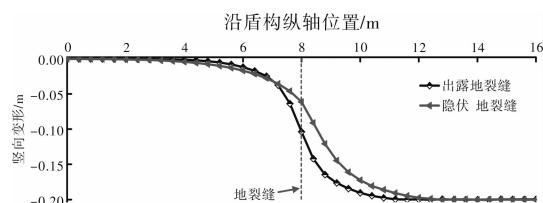


图6 90°工况下出露地裂缝与隐伏地裂缝活动下衬砌拱底竖向位移曲线

定的相互作用, 对下伏地裂缝沉降作用存在一定的抵抗作用, 最终作用在盾构隧道上的荷载较出露地裂缝情况下要小, 因此盾构隧道衬砌变形破坏程度相对要小。

## 3 结论

(1) 出露地裂缝的地表变形影响带主要集中于盾构隧道拱顶地表; 而隐伏地裂缝影响带比出露地裂缝的影响带的范围及深度都要大得多。

(2) 出露地裂缝模型边侧地表土体竖向位移主要是由于上下盘土体之间的摩擦产生的, 拱顶地表竖向位移除了受上下盘土体之间的相互摩擦影响外, 还存在结构对地表竖向位移的影响。对于隐伏地裂缝模型是由于地裂缝上盘土体发生沉降, 导致其上覆土体产生变形, 边侧地表土体的竖向位移为上下盘土体之间的摩擦及上覆地层的变形导致。

(3) 出露地裂缝与隐伏地裂缝活动作用下盾构衬砌拱底竖向位移曲线均为“S”形曲线, 出露地裂缝活动作用下盾构衬砌变形程度较隐伏地裂缝工况要大。

从上可知, 出露地裂缝活动对盾构隧道的影响较隐伏地裂缝大, 所以在实际工程中如果采用出露地裂缝模型来分析隐伏地裂缝活动下的盾构隧道变形破坏机制, 所得结果比实际情况要严重。

## 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 黄强兵, 彭建兵, 门玉明, 等. 地裂缝对地铁明挖整体式衬砌隧道影响机制的模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(11): 2324-2331.
- [3] 黄强兵, 彭建兵, 樊红卫, 等. 西安地裂缝对地铁隧道的危害及防治措施研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(5): 781-788.
- [4] 范文, 邓龙胜, 彭建兵, 等. 地铁隧道穿越地裂缝带的物理模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(9): 1917-1923.
- [5] 胡志平, 赵振荣, 朱启东, 等. 西安某地裂缝两侧黄土物理力学性质试验[J]. 地球科学与环境学报, 2009, 31(1): 85-88.
- [6] 门玉明, 石玉玲. 西安地裂缝研究中的若干重要科学问题[J]. 地球科学与环境学报, 2008, 30(2): 172-176.

(下转第33页)