

断裂带错动对既有隧道周围土体的变形特征分析

赵树林^{1*}, 孟令东², 刘中欣³, 张万里³, 杨永军³, 危君安⁴

1. 新疆乌京铁建轨道交通有限公司, 新疆 乌鲁木齐 830011

2. 北京市轨道交通建设管理有限公司, 北京 100068

3. 中铁十五局集团城市轨道交通工程有限公司, 广东 广州 510400

4. 上海先行建设监理有限公司, 上海 200070

DOI:10.61369/ETQM.2026030033

摘 要 : 断裂带错动是一种常见的地质现象, 其引起的隧道塌陷、隧道变形、衬砌破坏是隧道灾害防护中亟待解决的问题。本文采用离散元法, 对断裂带错动作用下既有隧道周围土体的位移和应力变化进行了模拟分析。结果表明, 断裂带错动后, 竖直方向土体最大位移出现在距地面 22.4m 处 (距离隧道轴线 7m), 最大位移约为 6.2cm; 在水平方向上, 位移最大值出现在距离隧道轴线 8.4m 的左右对称土体处, 最大位移约为 18.4cm。断裂带错动引起的最大应力变化发生在距隧道轴线 4~7m 范围内的土体中, 即对距轴线 4~7m 范围内的土体应力影响较大。

关 键 词 : 离散元法; 断裂带错动; 位移变化; 应力变化

Analysis of Deformation Characteristics of Soil Around Existing Tunnel Caused by Dislocation of Fault zone

Zhao Shulin^{1*}, Meng Lingdong², Liu Zhongxin³, Zhang Wanli³, Yang Yongjun³, Wei Jun'an⁴

1.Xinjiang Wujing Tiejian Rail Transit Co., LTD. Urumqi, Xinjiang 830011

2.Beijing Rail Transit Construction Management Co., LTD., Beijing 100068

3. China Railway 15th Bureau Group Urban Rail Transit Engineering Co., LTD., Guangzhou, Guangdong 510400

4. Shanghai Xianxing Construction Supervision Co., LTD. Shanghai 200070

Abstract : Fault zone dislocation is a common geological phenomenon, and the tunnel collapse, tunnel deformation and lining failure caused by it are urgent problems to be solved in tunnel disaster protection. In this paper, the discrete element method is used to simulate the displacement and stress changes of the soil around the existing tunnel under the fault zone misoperation. The results show that after the fault zone is dislocated, the maximum displacement of the soil in the vertical direction occurs at 22.4m from the ground (7m from the tunnel axis), and the maximum displacement is about 6.2cm; in the horizontal direction, the maximum displacement occurs at the symmetrical soil mass 8.4m away from the tunnel axis, and the maximum displacement is about 18.4cm. The maximum stress change caused by fault zone dislocation occurs in the soil within 4~7m from the tunnel axis, that is, it has a great influence on the soil stress within 4~7m from the axis.

Keywords : discrete element method; fracture zone misalignment; displacement changes; stress changes

引言

在隧道的地质灾害中, 由于活动断裂带错动而引起隧道的变形、塌陷、衬砌破坏等灾害是隧道灾害防治中经常面临的问题。活动断裂带对既有隧道的影响具有时间上的长期性和随机性, 所以对于由断裂带错动引起的隧道灾害防治增加了一定的困难。为解决由于断裂带引起的隧道灾害, 利用模拟或试验的方法对研究断裂带错动对既有隧道的影响就变得具有实际意义。

对于活动断裂带错动对于既有隧道影响的研究一直是学者们所关注的重点问题。张博阳等^[1]借助 MDIAS 软件研究了在双断面错动下穿越断裂带地铁隧道的受力与变形, 发现在断裂带的错动作用下, 衬砌结构的轴向应力主要分布在断裂带周围。刘娇等^[2]研究了在隧道施工影响下断裂带的活动规律。研究表明, 在隧道上部开挖对活动断裂带的影响更大。黄春峰等^[3]以乌鲁木齐地铁河南路为工程实例, 借助 PFC3D 软件, 分析了位于已有隧道下部的新建隧道在开挖过程中对已有隧道产生的影响。张向阳等^[4]分析了活动断层错动效应下隧道衬砌的破坏机理, 结果表明在断层的错动作用下, 竖直错动位移增大, 衬砌损坏影响区间增大。刘国钊等^[5]研究了活动断裂带错动作用下隧道纵向力学效应并进行了验证。祁彬溪等^[6]利用数值模拟的方法分析了粘结断层错动作用下穿越断层隧道结构的响应, 研

究结果表明断层的竖向移动使得隧道底面附近拉应力增大, 衬砌受拉范围增大, 易发生拉裂破坏。李林等^[7]对穿越高烈度地震区断层中的隧道围岩进行了地震响应分析, 结果表明断层带在地震作用下对隧道响应规律影响显著。朵生君^[8]提出了两种抗错动措施, 对穿越活动断层的隧道进行了抗错动研究。黄强兵等^[9]对断裂带下隧道开裂进行了研究。刘豆豆等^[10]以实际断裂带为工程背景, 研究了隧道的围岩稳定性, 发现了隧道结构在初次衬砌和二次支护时应力较大。朱文斌^[11]对新疆粉土类斜坡的变形及破坏进行了数值模拟, 发现含水率对粉土类斜坡的强度影响较大。许丁予^[12]借助汶川地震断裂带, 研究了高铁隧道穿越断裂带的抗错动机理及参数的设计, 对不同地震强度下隧道的破坏情况进行了分析。刘金水等^[13]对秦峪断裂带的断层活动方式进行了研究。卢海峰等^[14]以甘肃武威南缘断裂带为工程实例, 对其活动规律及变形进行了分析, 为青藏高原东北缘地层的变化提供了理论依据。

活动断裂带引起的隧道塌陷、隧道变形、衬砌破坏是隧道灾害防护中亟待解决的问题。学者们借助不同的角度研究了断裂带错动对隧道产生的影响, 但学者们基本是借助有限元软件与试验的方法来进行宏观层面的分析与研究, 对于离散元微观层面研究较少。因此, 本文借助离散元方法, 从土体颗粒层面研究了断裂带错动对既有隧道周围土体的变形特征。但活动断裂带错动现象的发生在时效上具有随机性和长期性, 因此选择数值模拟的方法来进行研究相对合适。本文借助于 PFC3D 离散元软件, 以乌鲁木齐轨道交通二号线马平区间西山断裂带北支为工程背景, 研究了未来活动断裂带由于错动效应而对隧道产生的影响。对于由断裂带错动导致的隧道灾害防护起到了一定的理论支撑。

一、工程概况

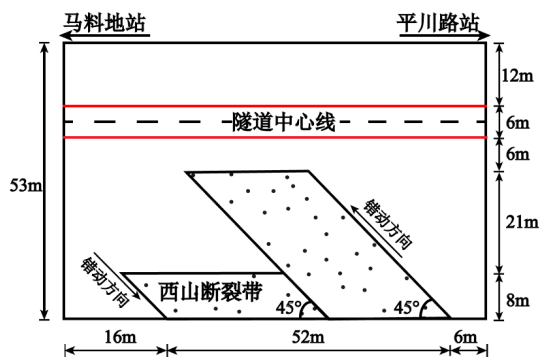


图1 西山断裂带横断面示意图

西山断裂带北支长约6km, 倾斜角度约为45°, 宽度约为52m。路线为马料地站~平川路站, 区间为 ZDK17+235.3~ZDK18+300.1, 此路线经过西山断裂带北支断层。马料地站~平川路站线路全长1064.9m, 隧道埋深为10.5m~17m。隧道基本位于杂填土、粉土、含砾粉土、圆砾之中, 其中经过断裂带的隧道结构基本位于粉土之中。隧道内径为3m, 衬砌管片厚度为0.35m, 左右隧道结构通过联络通道进行衔接。西山断裂带横断面如图1所示。

二、数值模型建立

(一) 土体错动角度模拟

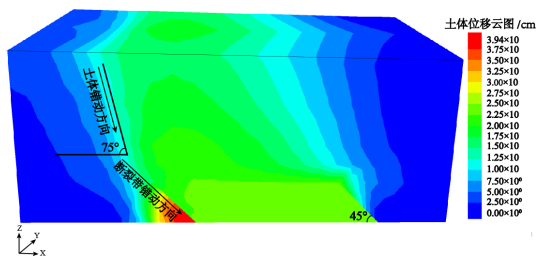


图2.1 土层错动方向云图

本文选取斜向下错动的断裂带进行模拟, 通过 FLAC3D 软

件, 模拟得出断裂带沿着45°向下错动20cm时(本次模拟土体错动最大值为18cm, 故选择20cm), 断裂带上部土体的错动方向为近似沿75°向下移动, 土体错动方向云图如图2.1所示。

(二) 离散元模型建立

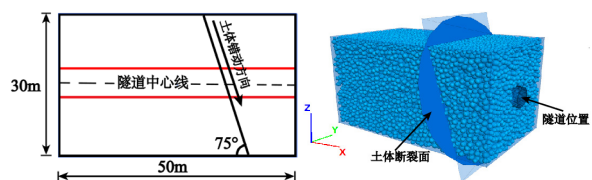


图2.2 离散元模型示意图

本文借助于 PFC3D 离散元模拟软件, 构建尺寸为 50m×30m×30m 的计算模型。结合乌鲁木齐地铁2号线西山断裂带附近隧道埋深, 以隧道顶拱距离地面12m, 底拱距离地面18m为隧道埋深建立数值模型。土体错动模拟是通过给墙体施加一定速度来带动土体颗粒模拟错动, 控制计算时步和循环次数来定量错动带错动的竖向位移。因穿越断裂带隧道大部分位于粉土之中, 所以隧道周围土体的模拟以粉土为主。为了节省计算时间, 将颗粒半径以相应比例放大进行离散元数值建模。整个模型建立26076个球颗粒来模拟土体颗粒, 离散元模型视图及衬砌结构如图2.2和图2.3所示。离散元法是基于细观参数进行模拟计算, 朱文斌^[11]以乌鲁木齐地铁项目为工程实例, 通过 PFC 双轴试验求得了乌鲁木齐粉土的细观参数, 本文采用朱文斌模拟所得细观参数进行建模与分析, 具体细观参数如表1所示。

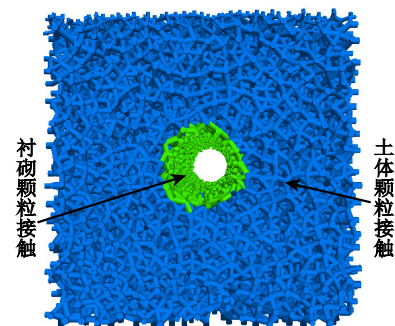


图2.3 衬砌结构示意图

表1 土层及衬砌力学参数

参数名称	粉土	衬砌
半径/m	0.006~0.009	0.006~0.009
颗粒密度/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	2720	2500
摩擦系数	0.5	0.5
颗粒接触模量/ pa	4×10^7	1.67×10^9
平行粘结模量/ pa	4×10^7	6.67×10^{11}
平行粘结刚度比	1.1	0.07
刚度比	1.1	0.01
粘聚力/ pa	1×10^6	8×10^6
内摩擦角/ $^\circ$	20	40

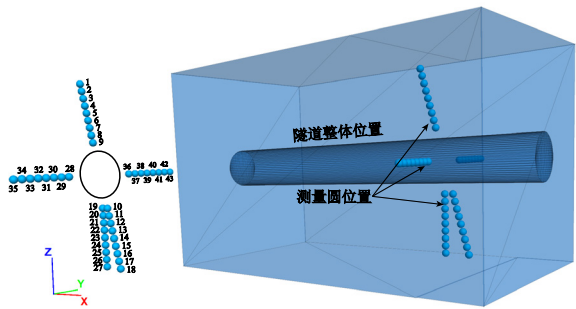


图2.4 测量点布置范围图

为分析断裂带在不同错动位移下隧道周围土体的位移与应力变化,在进行模型建立时设置43个测量圆对土体颗粒进行监测。测量圆的检测位置及编号如图2.4所示。其中1号测量点位于距离地面3m的位置处;9、10、19、28、36号测量点均位于距离隧道衬砌1m的位置处;1~9号、10~18号测量点在错动带上沿错动方向每隔竖向距离为1m布置每个;19~27号沿竖直方向每隔1m布置每个;28~35号、36~43号测量点沿错动带水平方向每隔1m布置每个。

三、数值模拟结果分析

本文模型通过错动层位移的变化来实时监测隧道周围土体的位移和应力,研究不同错动位移下土体的位移和应力变化。模拟过程中错动位移取2cm、4cm、6cm、8cm、10cm、12cm、14cm、16cm、18cm。具体分析如下。

(一) 理论基础

本文离散元模型采用线性平行粘结模型,颗粒之间满足力-位移定律。颗粒之间的单元力分解为法向单元应力 σ 和切向单元应力 τ ,则单元应力可表示为:

$$\overline{F}_n = \overline{F}_n + \overline{k}_n \overline{A} \Delta \delta_n \quad \sigma = \frac{\overline{F}_n}{\overline{A}} \quad (1)$$

$$\overline{F}_s = \overline{F}_s - \overline{k}_s \overline{A} \Delta \delta_s \quad \tau = \frac{\overline{F}_s}{\overline{A}} \quad (2)$$

式中 $\overline{F}_n$:单位法向力、 $\overline{k}_n$:单位法向刚度、 $\overline{F}_s$:单位切向力、 $\overline{k}_s$:单位切向刚度、 $\overline{A}$:单位接触面积、 $\Delta \delta_n$:刚度相对法向位移增量、 $\Delta \delta_s$:刚度相对切向位移增量。

(二) 位移分析

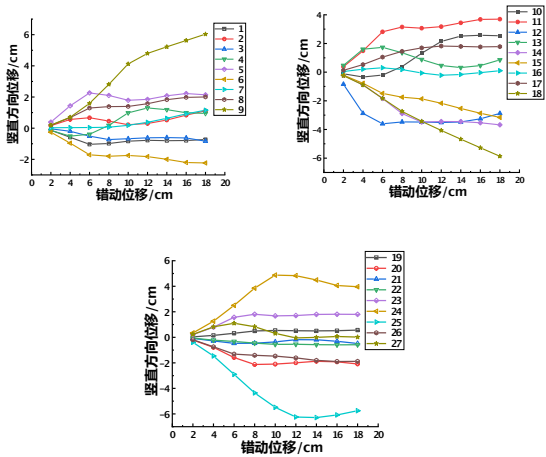


图3.2.1 竖向测量点位移变化图

对1~27号测量点(竖直方向)处土体竖向位移分析可知,随着错动位移的增加,不同测量点处土体位移基本呈现逐渐增大且趋于平稳的趋势,大体以错动位移为8cm作为分界点,错动位移小于8cm时,土体竖向位移逐渐增大,错动位移大于8cm时,土体竖向位移基本趋于平缓。对于1~9号(-2.6m~-10.6m:以地面为起始面)测量点,位移变化最大值出现在9号(-10.6m)测量点附近土体处,土体运动方向为向上运动,位移变化最大值为5.8cm;2号(-3.6m)测量点附近土体位移变化有较小波动。10~18号(-19.4m~-27.4m)测量点的位移变化最大值出现在18号测量点处,最大位移为5.8cm,位移方向为向上运动;13号(-3.6m)测量点土体处位移变化呈现一定的波动趋势。19~27号(-19.4m~-27.4m)测量点处土体位移最大值出现在25号(-25.4m)测量点处,运动方向为向下运动,位移变化最大值为6.2cm。竖向测量点位移变化如图3.2.1所示。

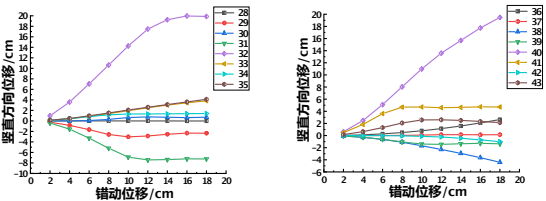


图3.2.2 水平测量点位移变化图

28~43号(水平方向距隧道中心轴4.4m~11.4m)测量点竖向位移变化较大值出现在距隧道轴线5.4m~9.4m(29~33号、37~41号)的位置范围内。其中28~35号(隧道左侧距离中心轴4.4m~11.4m)测量点,竖向位移最大值出现在32号(8.4m)测量点处,运动方向为向上运动,位移变化最大值为18.2cm。36~43号(隧道右侧距离中心轴4.4m~11.4m)测量点土体位移最大值出现在40号(8.4m)测量点处,运动方向为向上运动,位移变化最大值为18.4cm。除上述测量点外,其余测量点附近土体位移变化不大。32、40号测量点沿隧道轴线左右对称分布,模拟所得位移变化也基本一致。水平测量点竖向位移变化如图3.2.2所示。

(三) 应力分析

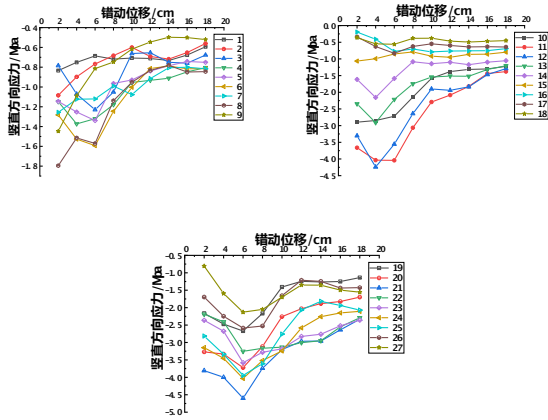


图 3.3.1 竖向测量点应力变化图

通过对1~9号(- 2.6m~ - 10.6m; 以地面为起始面)测量点的竖向应力分析可知, 竖向应力在距地面 - 5.6m~ - 7.6m(3号~5号)范围内随错动位移的增大而呈现先增大后减小的趋势, 总体范围内竖向应力随错动位移增大而减小;8号(- 9.6m)测量点处土体颗粒的竖向应力最大, 应力最大值出现在断层位移为2cm处, 最大值为1.8Mpa。对于10~18号(- 19.4m~ - 27.4m)测量点附近土体颗粒, 竖向应力变化呈现先增大后减小的变化趋势, 以4~6cm为分界带, 当错动位移为小于4cm时, 竖向应力逐渐增大, 当错动位移为大于4或6cm时, 竖向应力逐渐减小。对于19~27号(- 19.4m~ - 27.4m)测量点附近土体颗粒, 竖向应力变化呈现先增大后减小的变化趋势, 以错动位移6cm为分界点, 错动位移小于6cm时, 竖向应力逐渐增大, 错动位移大于6cm时, 竖向应力逐渐减小。10~27号测量点应力最大值出现在12号、21号测量点(均距地面21.4m)处, 最大值分别为4.2Mpa、4.6Mpa。对比分析可得, 竖直方向上断裂带错动引起的最大应力变化发生在距隧道轴线4~7m范围内的土体中。竖向测量点应力变化如图3.3.1所示。

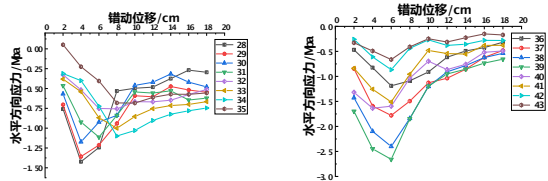


图 3.3.2 水平测量点应力变化图

参考文献

- [1] 张博阳, 雷军, 杨子汉等. 基于双断面错动的地铁隧道穿越断裂带变形与受力特征分析 [J]. 低温建筑技术, 2021, 43(04): 106-110.
- [2] 刘娇, 王克成, 刘玉宝等. 地铁隧道施工影响下活动断裂带活化规律研究 [J]. 工程建设, 2021, 53(11): 7-12.
- [3] 黄春峰, 赵苏文, 孙森军等. 基于 PFC3D 的新建下穿隧道对既有隧道的影响分析 [J]. 水力发电, 2022, 48(03): 43-47.
- [4] 张向阳, 任尚磊, 许林峰. 断层错动作用下隧道衬砌围岩破坏机理研究 [J]. 地下空间与工程学报 [J], 2021, 17(01): 290-299.
- [5] 刘国钊, 乔亚飞, 何满潮等. 活动性断裂带错动下隧道纵向响应的解析解 [J]. 岩土力学, 2020, 41(03): 923-932.
- [6] 祁彬溪, 王凡, 陈捷翎. 粘滑断层错动作用下穿越断层隧道结构响应数值模拟 [J]. 建筑结构, 2020, 50(S2): 753-758.
- [7] 李林, 何川, 耿洋等. 隧道穿越高烈度地震区断层带围岩地震响应分析 [J]. 重庆大学学报, 2012, 35(06): 92-98.
- [8] 朵生君, 李国良, 张景. 穿越活动断裂带隧道抗错断措施研究 [J]. 兰州交通大学学报, 2021, 40(03): 7-14.
- [9] 黄强兵, 郭瑞, 张宁等. 西安地铁临潼线穿越地裂缝及断裂带隧道抗裂设防研究 [J]. 现代隧道技术, 2018, 55(06): 144-151.
- [10] 刘豆豆, 陈卫忠, 杨建平等. 两廊断裂带十漫高速公路隧道围岩稳定性研究 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2009, 41(06): 191-193+212.
- [11] 朱文斌. 新疆粉土类斜坡水劣化变形破坏试验及模拟研究 [J]. 科学与技术工程, 2019, 19(15): 238-245.
- [12] 许丁予. 高铁隧道工程穿越汶川地震断裂带抗错动机理与设计参数研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2015.
- [13] 刘金水, 刘伟, 陈凌伟等. 秦岭断裂带断层泥物质特征及活动方式研究 [J]. 地下水, 2022, 44(01): 162-163.
- [14] 卢海峰, 陈海龙, 杨勇等. 甘肃武威盆地南缘断裂带晚第四纪活动特征及变形分析 [J]. 地质通报, 2022, 41(Z1): 327-346.

对断裂带水平方向上的测量点进行分析可知, 28~35号(隧道左侧距离中心轴4.4m~11.4m)测量点处土体的水平应力随错动位移的增大而呈现先增大后减少的趋势, 且以错动位移为4~8cm为过渡带。36~43号(隧道右侧距离中心轴4.4m~11.4m)测量点处土体的水平应力随错动位移的增大而呈现先增大后减少的趋势, 且以错动位移为6cm为过渡点。对比分析可得, 水平方向上断裂带错动引起的最大应力变化发生在距隧道轴线4~7m范围内的土体中。水平测量点水平应力变化如图3.2.2所示。

四、结论

本文通过 PFC3D 离散元软件, 研究了由于断裂带而导致的土体错动对既有隧道周围土体的位移和应力变化, 研究结果表明:

(1) 模拟结果表明在错动带竖直方向上, 随着错动带错动位移的增加, 不同测量点处土体位移基本呈现逐渐增大且趋于平稳的趋势, 大体以错动位移为8cm作为分界点, 错动位移小于8cm时, 土体竖向位移逐渐增大, 错动位移大于8cm时, 土体竖向位移基本趋于平缓, 位移最大值为6.2cm。在错动带水平方向上竖向位移较大值出现在距隧道轴线5.4m~9.4m(29~33号、37~41号)的位置范围内, 且最大值在32、40号测量点(距轴线8.4m)土体处, 最大值为18.4cm, 32、40号测量点沿隧道轴线左右对称分布, 模拟所得位移变化基本一致。

(2) 对比应力变化可知, 距离地面2.6m~10.6m处土体(1~9号测量点)的竖向应力随错动位移增大而减小。距离地面19.4m~27.4m(10~27号测量点)附近土体颗粒, 竖向应力变化呈现先增大后减小的变化趋势, 应力变化以错动距离4~6cm为分界带, 1~27号测量点应力最大值出现在距地面21.4m(12、21号测量点)处。隧道左侧距离中心轴4.4m~11.4m处(28~35号测量点)土体的水平应力随错动位移的增大呈现先增大后减少的趋势, 且以错动位移为4~8cm为过渡带。隧道右侧距离中心轴4.4m~11.4m处(36~43号测量点)土体的水平应力随错动位移的增大呈现先增大后减少的趋势, 且以错动位移为6cm为过渡点。对比分析可得, 断裂带错动引起的最大应力变化发生在距隧道轴线4~7m范围内的土体中, 即对距离隧道轴线4~7m范围内的土体应力影响较大。