

ISSN 1001-3946  
CN13-1100/TF

# 勘察科学技术®

SITE INVESTIGATION SCIENCE AND TECHNOLOGY

4

2018

总第217期

中勘冶金勘察设计  
研究院有限责任公司

# 勘察科学技术

KANCHA KEXUE JISHU

双月刊 1983 年创刊

2018 年第 4 期 总第 217 期

中国科技核心期刊

中国科学引文数据库来源期刊

中国核心期刊(遴选)数据库收录期刊

中国学术期刊综合评价数据库统计源期刊

## 编辑委员会

(2018 ~ 2019 年)

名誉主任 施 设(名誉主编)  
主 任 杨书涛(主编)  
副 主 任 沈小克 张栋材 黄 明  
委 员 (按姓氏笔画排序)  
王 清 王长科 王志刚 王哲英  
化建新 丘建金 伍法权 许再良  
李 晓 李文鹏 吴永红 吴顺川  
邹长春 张 炜 张发旺 张光辉  
邵景力 武 威 武 强 罗书学  
周 训 周志芳 周宏磊 周念清  
赵明华 赵勇胜 姜晨光 耿光旭  
奚进泉 高永涛 唐辉明 董忠级  
傅旭东

主 管 中勘冶金勘察设计院有限责任公司  
主 办  
主 编 杨书涛  
副 主 编 毕丹华  
编辑出版 《勘察科学技术》编辑部  
地 址 河北省保定市东风中路 1285 号  
邮 编 071069  
电 话 0312-3020887 3094054  
网 址 <http://kckxjs/periodical.net.cn>  
<http://kckx.chinajournal.net.cn>  
E-mail kckxjs@163.com

中国标准连 ISSN 1001-3946  
续出版物号 CN13-1100/TF

发行范围 国内外公开发行

国外发行 中国国际图书贸易总公司  
(北京 399 信箱)

国内发行 保定市邮政局

邮发代号 18-153

印 刷 保定华泰印刷有限公司

定 价 每册 10.0 元 全年 60.0 元

出版日期 2018 年 8 月 20 日

## 目 次

### 理论与技术

- 平行地裂缝地铁隧道土压力计算方法  
..... 刘妮娜 赵 腾 谢小丽 (1)
- 高陡露天矿边坡稳定性评价中若干问题的思考  
..... 梅 金 张志国 张立鹏 (7)
- GA-SVM 模型的 GPS 高程拟合效果分析  
..... 沈哲辉 蔡乾广 张安银 等 (12)
- 基于 FME 的基础测绘数据向 GIS 格式转换的研究  
..... 曾国萍 刘盛庆 (15)
- GNSS 观测中移动平均法和小波变换的滤噪效果比较  
..... 白天阳 兰孝奇 王德军 等 (19)
- 一种精密检测隧道洞门钢环的新方法  
..... 黄成龙 黄 腾 毕继鑫 (23)
- 基于高密度电法的高阻侵入体的探测研究  
..... 赵毅锋 姜 丰 沈 浩 等 (26)
- 多年冻土区的综合物探技术研究  
..... 习建军 李党民 邸 龙 等 (30)

### 应用与经验

- 预裂爆破在弓长岭露天铁矿的应用  
..... 张忠政 房洪亮 秦志辉 等 (36)
- 兰合铁路红地沟中桥岸坡稳定性分析..... 王 旭 (39)
- 老挝某金矿选矿场区边坡稳定性评价及防治措施..... 王亚明 (42)
- 基于数值法的某大坝渗流安全分析..... 邱辉阳 黄 勇 (48)
- 某石化企业管线测量成果质量管理  
..... 商宇人 王 朕 王建国 (52)
- 钻孔式三维激光扫描仪在岩溶空穴形态测量中的应用  
..... 王 军 赵 虎 郭 凯 (56)
- 大数据量采集的电阻率成像法在城市工程中的应用  
..... 蔡克俭 吴宇豪 廖 智 等 (59)
- 天津市宁河活动断层浅层地震勘察分析..... 焦尚斌 (62)

### 信息之窗

- 征稿简则 ..... (封三)  
广告 ..... (封二、封底)

编辑: 刘丹丽 耿连昶 李占良 王士鹏 毕丹华 葛瑞凤

## CONTENTS

- Earth pressure calculation method of metro tunnel parallel to ground fissures ..... Liu Nina et al. ( 1 )
- Thinking of some problems about stability evaluation of high and steep open-pit slope ..... Mei Jin et al. ( 7 )
- Effect analysing of GPS height fitting based on GA-SVM model ..... Shen Zhehui et al. ( 12 )
- Research on conversion of basic surveying data to GIS format based on FME ..... Zeng Guoping et al. ( 15 )
- Comparison of filtering effect between moving average method and wavelet transform in GNSS observation ... Bai Tianyang et al. ( 19 )
- A new method for precision detection of steel ring in tunnel portal ..... Huang Chenglong et al. ( 23 )
- Detection study on high-resistance invasive media based on high-density electrical method ..... Zhao Yifeng et al. ( 26 )
- Study on comprehensive geophysical prospecting technology in permafrost region ..... Xi Jianjun et al. ( 30 )
- Application of pre-splitting blasting in Gongchangling Open-pit Iron Mine ..... Zhang Zhongzheng et al. ( 36 )
- Analysis on stability of bank slope of Hongdigou middle bridge in Lanhe Railway ..... Wang Xu ( 39 )
- Evaluation of slope stability and prevention and control measure in a gold mineral processing field in Laos ..... Wang Yaming ( 42 )
- Safety analysis of a dam seepage flow based on numerical method ..... Qiu Huiyang et al. ( 48 )
- Quality management of pipeline measurement results of a petrochemical enterprise ..... Shang Yuren et al. ( 52 )
- Application of borehole three-dimensional laser scanner in morphology of karst cavitation ..... Wang Jun et al. ( 56 )
- Application of resistivity imaging method collecting by mass data in urban engineering ..... Cai Kejian et al. ( 59 )
- Shallow seismic exploration and analysis of active faults in Ninghe District, Tianjin City ..... Jiao Shangbin ( 62 )

## SITE INVESTIGATION SCIENCE AND TECHNOLOGY

(Bimonthly, Started in 1983)

No. 4 (Total No. 217)

Aug., 2018

### Editor and Publisher:

Editorial Office of Site Investigation Science and Technology

### Address:

1285 Dongfeng Middle Road, Baoding City,  
Hebei Province, China

Tel: (0312) 3020887 3094054

Fax: (0312) 3034561

E-mail: kekxjs@163.com

Web Site: <http://kekxjs/periodical.net.cn>  
<http://kekx.chinajournal.net.cn>

### Overseas Distributor:

China International Book Trading Corporation  
(P. O. Box 399, Beijing, China)

Journalistic Code: ISSN 1001-3946  
CN13-1100/TF

中勘测  
70年代初迁  
的大型综合  
一级证书、  
书、工程质



地址  
传真

中国标准

# 平行地裂缝地铁隧道土压力计算方法

刘妮娜<sup>1,2</sup> 赵腾<sup>3</sup> 谢小丽<sup>3</sup>

(1. 长安大学 地质工程与测绘学院 西安市 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 西安市 710054; 3. 同济大学 地下建筑与工程系 上海市 200092)

**提 要** 针对西安地铁三号线工程部分区间段存在近距离平行西安地裂缝的工程现象,通过力学解析方法对地铁隧道所受土压力进行分析。在建立平行地裂缝地铁隧道力学模型的基础上,根据所取计算单元的极限平衡条件推导得到隧道竖向土压力和水平土压力,并通过拟静力化的方法对地震作用进行简化,分析地震动荷载作用下隧道土压力特征。计算结果表明,地裂缝活动导致上盘产生竖向土压力减小区,而下盘出现竖向土压力增大区。根据规范推荐的方法对平行地裂缝的地铁隧道进行设计是合理的。

**关键词** 地铁 地震荷载 活动地裂缝 近距离平行 力学分析

## Earth Pressure Calculation Method of Metro Tunnel Parallel to Ground Fissures

Liu Nina<sup>1,2</sup> Zhao Teng<sup>3</sup> Xie Xiaoli<sup>3</sup>

(1. School of Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University; 2. Key Laboratory of Western China's Mineral Resources and Geological Engineering of Ministry of Education, Chang'an University; 3. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University)

**Abstract** In view of the engineering phenomenon of short distance parallel to Xi'an ground fissure in some interval sections of No. 3 line of Xi'an metro project, through the analytical method of mechanics, the soil pressure to metro tunnel is analysed. Based on building the mechanical model of the metro tunnel parallel to ground fissure, the vertical earth pressure and horizontal earth pressure of tunnel are derived according to the limit equilibrium condition of the calculated units, and through the pseudo static method, the seismic action is simplified, the characteristics of tunnel soil pressure under the ground motion load are analysed. The calculation results show that the activity of ground fissure leads to vertical earth pressure decreasing area on the upper wall, while the vertical soil pressure increases in footwall. It is reasonable to design the metro tunnel parallel to ground fissure according to the method recommended by the code.

**Keywords** metro; earthquake load; active ground fissures; short distance parallel; mechanical analysis

## 1 引 言

地裂缝是一种广泛分布的地质灾害。目前西安市区在临潼—长安断裂以北已探明有14条地裂缝,其对城市工程建设造成巨大的破坏。西安地铁3号线一期工程有15处穿越了8条地裂缝,且多处区间存在着地铁隧道与地裂缝呈近距离平行的

复杂工程地质问题。

关于隧道土压力计算方法,国内外的相关学者从不同的角度研究取得了一定的进展。贺凯等<sup>[1]</sup>利用大型物理模型试验方法研究了近距离平行地裂缝的地铁隧道的力学特性。顾安全<sup>[2]</sup>对不同隧道土压力计算方法的求解思路进行了总结。受地裂缝活动的影响,地铁隧道所受土压力的情况与一般的浅埋地铁隧道有着明显的不同。孟振江等<sup>[3]</sup>通过数值模拟发现地裂缝活动造成上下盘地层的竖向应力呈近似反对称的分布形态,且地层应力的变化增量随上盘沉降的增加而增大。黄强兵等<sup>[4]</sup>针对正交穿越地裂缝的地铁隧道提出基于地层挟

基金项目:国家自然科学基金项目(41502277);中央高校基本科研业务费科技创新项目(300102268502);国家973计划项目(2014CB744700);中国地质调查局地质调查项目(DD20160264)

作者简介:刘妮娜(1975-),女,副教授,工学博士,从事岩土工程研究。

收稿日期:2017-12-21

持作用的地裂缝荷载计算方法。

本文以西安3号线地铁隧道部分区间段近距离平行地裂缝带为工程背景,计算土体单元所受的土压力。研究结果对于利用荷载-结构法进行地铁隧道设计时,如何合理的考虑静力状态以及地震作用下近距离平行地裂缝的地铁隧道所受的土压力有一定的工程应用价值。

## 2 分析方法

### 2.1 计算单元选取

平行地裂缝地铁隧道的受力情况可简化为平面应变问题来进行考虑,取横断面进行分析。假设位于地裂缝上盘的地铁隧道正上方土体受地裂缝上盘土体向下滑动所产生的拖拽作用,使得其沉降快于周围土体。这种差异沉降使得地铁隧道正上方土体形成竖直滑动面,将其简化为隧道右拱腰处的切线。平行地裂缝的地铁隧道上方的土体同时受到地裂缝和竖直滑动面的限制。在土体两侧滑动面上的摩阻力作用下,平行地裂缝地铁隧道所受到的土压力情况不同于与无地裂缝作用时的地铁隧道。地铁隧道位于地裂缝上盘时的力学模型如图1所示。

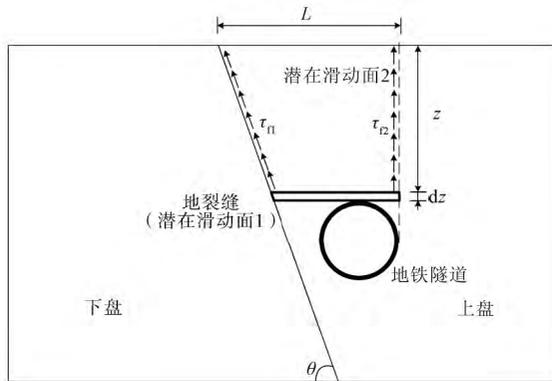


图1 地裂缝上盘的力学模型示意

图1中,地表处地裂缝与隧道右拱腰的距离为L,地裂缝倾角为 $\theta$ ,计算单元的深度为z,厚度为dz。取地铁隧道上方的土体计算单元进行受力分析,如图2所示。

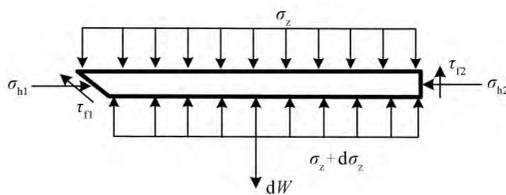


图2 地裂缝上盘土体单元受力示意

土体计算单元受到以下力的作用:

1) 计算单元的自重应力 dW:

$$dW = \frac{1}{2} \times \left[ \left( L - \frac{z}{\tan\theta} \right) + \left( L - \frac{z + dz}{\tan\theta} \right) \right] \times \gamma dz \approx \frac{(L \tan\theta - z) \gamma dz}{\tan\theta} \quad (1)$$

2) 计算单元在地裂缝一侧所受到的沿地裂缝方向向上的摩阻力  $\tau_{n1}$  以及侧向土压力  $\sigma_{h1}$ ,其表达式为:

$$\tau_{n1} = \sigma_{h1} \sin\theta \tan\varphi_1 + c_1 \quad (2)$$

式中  $c_1, \varphi_1$  分别为地裂缝充填物的黏聚力和内摩擦角。

$$\sigma_{h1} = K_1 \sigma_z \quad (3)$$

3) 计算单元在竖直滑动面一侧所受到的竖直向上的摩阻力  $\tau_{t2}$  以及侧向土压力  $\sigma_{h2}$ ,其表达式为:

$$\tau_{t2} = \sigma_{h2} \tan\varphi_2 + c_2 \quad (4)$$

$$\sigma_{h2} = K_2 \sigma_z \quad (5)$$

式中  $c_2, \varphi_2$  分别为土层的黏聚力和内摩擦角。

假设位于地裂缝下盘的地铁隧道正上方土体受地裂缝上盘土体向下滑动所产生的沿地裂缝方向向上的摩擦力,使得其相对于周围土体有向上的运动趋势。与地铁隧道位于地裂缝上盘的情况类似,可以建立地铁隧道位于地裂缝下盘时的力学模型并计算单元的受力,如图3、4所示。

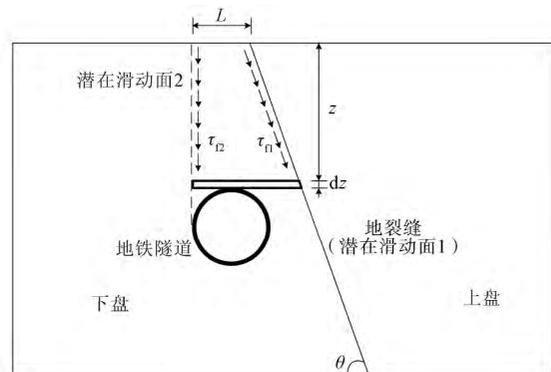


图3 地裂缝下盘的力学模型示意

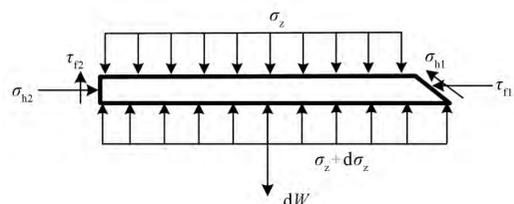


图4 地裂缝下盘计算单元受力示意

各参数的含义及其表达式与地铁隧道位于地裂缝上盘时相同,但计算单元的自重应力 dW 的表达式不同于上盘。位于地裂缝下盘的计算单元自

重应力为:

$$dW = \frac{1}{2} \times \left[ \left( L + \frac{z}{\tan\theta} \right) + \left( L + \frac{z+dz}{\tan\theta} \right) \right] \times \gamma dz \approx \frac{\left( L \tan\theta + z \right) \gamma dz}{\tan\theta} \quad (6)$$

### 2.2 拟静力法考虑地震作用

基于拟静力方法,将水平和竖直两个方向的地震作用力等效成地震加速度系数与土单元的乘积,即计算单元受到水平地震惯性力  $dF_{EH}$  和竖直地震惯性力  $dF_{EV}$ 。取竖向地震作用系数为  $\alpha$ ,则竖向地震作用力为  $\alpha dW$ 。由于工程结构更容易遭受水平地震力的作用,同时参考我国规范《水工建筑物抗震设计规范》(DL5073-2016)和《水利水电工程边坡设计规范》(SL386-2007),假设  $dF_{EH} = 3dF_{EV}$ 。由于实际的地震力可在正负两个方向反复作用,本文以对地铁隧道最不利情况进行研究,即假设竖直地震惯性力方向,以向下为正水平地震惯性力方向,以背离地裂缝的方向为正。地震作用下地裂缝上盘和下盘的计算单元受力情况如图 5、6 所示。

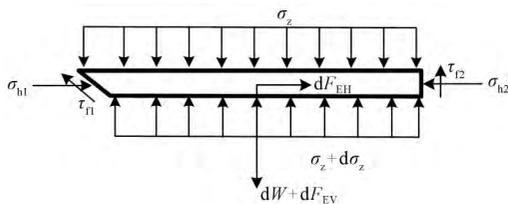


图 5 地震作用下地裂缝上盘计算单元受力示意  
对于地裂缝上盘的计算单元:

$$dF_{EH} = 3\alpha dW = 3\alpha \frac{(L \tan\theta dz - z dz) \gamma}{\tan\theta} \quad (7)$$

$$dF_{EV} = \alpha dW = \alpha \frac{(L \tan\theta dz - z dz) \gamma}{\tan\theta} \quad (8)$$

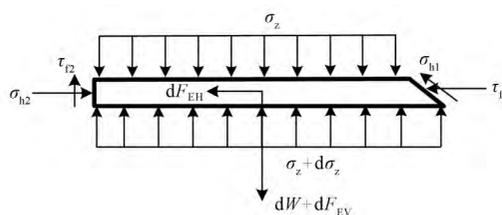


图 6 地震作用下地裂缝下盘计算单元受力示意  
对于地裂缝下盘的计算单元:

$$dF_{EH} = 3\alpha dW = 3\alpha \frac{(L \tan\theta dz + z dz) \gamma}{\tan\theta} \quad (9)$$

$$dF_{EV} = \alpha dW = \alpha \frac{(L \tan\theta dz + z dz) \gamma}{\tan\theta} \quad (10)$$

### 2.3 侧压力系数讨论

在利用计算单元的受力平衡条件求解土竖向土压力  $\sigma_z$  和水平土压力  $\sigma_x$  时,侧向土压力系数  $K$

会对计算结果带来较大的影响。Marston 在求解埋管土压力时未考虑土条单元的侧面所处在极限平衡状态,推荐侧向土压力系数为 Rankine 主动土压力系数  $K_a^{[5]}$ 。之后 Krynine 对 Marston 所做的假设进行了修正<sup>[6]</sup>。但是前人的研究大多认为描述竖向土压力与水平土压力关系的侧压力系数是不随深度变化的常数,这显然与实际情况存在差异。

设竖直滑动面的受力条件符合 Mohr-Coulomb 强度准则,在前人所做研究的基础上<sup>[7]</sup>,根据计算单元竖直滑动面上土单元的极限平衡条件,进行侧向土压力系数的推导。竖直滑动面上处于极限平衡状态的土单元的应力莫尔圆如图 7 所示。

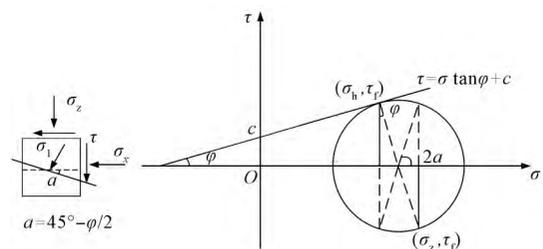


图 7 竖直滑动面上的应力状态及其应力莫尔圆

根据图 7 结合竖直滑动面上土单元的受力特点,可以得到式(11)~(13):

$$\tau_{12} = \sigma_{h2} \tan\varphi_2 + c_2 \quad (11)$$

$$\sigma_{h2} + 2\tau_{12} \tan\varphi_2 = \sigma_z \quad (12)$$

$$\sigma_{h2} = K_2 \sigma_z \quad (13)$$

联立式(7)~(9),可以得到竖直滑动面上的侧向土压力系数  $K_2$  的解析式:

$$K_2 = \frac{1}{1 + \tan^2 \varphi_2} - \frac{2c_2 \tan\varphi_2}{\sigma_z (1 + \tan^2 \varphi_2)} \quad (14)$$

根据计算单元水平方向受力平衡条件,得到:

$$\tau_{11} \cos\theta \frac{dz}{\sin\theta} + K_2 \sigma_z dz = K_1 \sigma_z dz \quad (15)$$

将各相关变量带入式(15)可以得到地裂缝一侧的侧向土压力系数  $K_1$ :

$$K_1 = \frac{\frac{c_1 \cot\theta}{\sigma_z} + \frac{1}{1 + \tan^2 \varphi_2} - \frac{2c_2 \tan\varphi_2}{\sigma_z (1 + \tan^2 \varphi_2)}}{1 - \tan\varphi_1 \cos\theta} \quad (16)$$

考虑作用在计算单元上的水平地震力,根据计算单元水平方向的受力平衡条件,则有:

$$\tau_{11} \cos\theta \frac{dz}{\sin\theta} + K_2 \sigma_z dz = K_1 \sigma_z dz + 3\alpha dW \quad (17)$$

地震作用下地裂缝一侧的水平土压力系数:

$$K_1 = \frac{\left[ -\frac{1}{1 + \tan^2 \varphi_2} + \frac{2c_2 \tan \varphi_2}{\sigma_z (1 + \tan^2 \varphi_2)} + \frac{-c_1 \cot \theta}{\sigma_z} + \frac{3\alpha(\gamma L - \frac{\gamma z}{\tan \theta})}{\sigma_z} \right]}{\tan \varphi_1 \cos \theta - 1} \quad (18)$$

$$q(z) = \frac{\left[ -\frac{\gamma z}{\tan \theta} + \gamma L - c_2 - c_1 + \frac{2c_2 \tan^2 \varphi_2}{1 + \tan^2 \varphi_2} - \left( c_1 \cot \theta - \frac{2c_2 \tan \varphi_2}{1 + \tan^2 \varphi_2} \right) \frac{\tan \varphi_1 \sin \theta}{1 - \tan \varphi_1 \cos \theta} \right]}{L - \frac{z}{\tan \theta}} \quad (22)$$

2.4 土压力求解

限于篇幅,这里以地裂缝上盘不考虑地震作用下的土压力求解过程为例,给出详细的推导过程。

根据计算单元竖直方向的力学平衡,得到:

$$\sigma_z \left( L - \frac{z}{\tan \theta} \right) + dW + dF_{EV} = (\sigma_z + d\sigma_z) \left( L - \frac{z + dz}{\tan \theta} \right) + \tau_{11} dz + \tau_{12} dz \quad (19)$$

将各相关变量带入到式(19)中,得到:

$$\frac{d\sigma_z}{dz} = p(z) \sigma_z + q(z) \quad (20)$$

这里  $p(z)$  和  $q(z)$  都是深度  $z$  的函数。其中,

$$p(z) = \frac{\left[ -\frac{1}{1 + \tan^2 \varphi_2} \frac{\tan \varphi_1 \sin \theta}{1 - \tan \varphi_1 \cos \theta} + \frac{1}{\tan \theta} - \frac{\tan \varphi_2}{1 + \tan^2 \varphi_2} \right]}{L - \frac{z}{\tan \theta}} \quad (21)$$

式(19)的边界条件为:

$$\sigma_z \Big|_{z=0} = 0 \quad (23)$$

根据边界条件解式(19),得到:

$$\sigma_z = (B - Cz)^{-\frac{A}{C}} \left\{ \begin{aligned} & \frac{D}{C(A+C)} (B - Cz)^{\frac{A}{C}+1} \\ & - \left( \frac{BD}{AC} + \frac{E}{A} \right) (B - Cz)^{\frac{A}{C}} \\ & - \left[ \frac{DB^{\frac{A}{C}+1}}{C(C+A)} - \left( \frac{BD}{AC} + \frac{E}{A} \right) B^{\frac{A}{C}} \right] \end{aligned} \right. \quad (24)$$

可以通过推导发现在地裂缝上下盘,竖向土压力  $\sigma_z$  解答关于  $A, B, C, D, E$  等5个变量的表达式是相同的。在不同情况下  $A, B, C, D, E$  等5个变量的表达式如表1所示。

表1 各参数的表达式

状态	各部分的解析式
地裂缝上盘 不考虑地震作用	$A = -\frac{\tan \varphi_2}{1 + \tan^2 \varphi_2} - \frac{1}{1 + \tan^2 \varphi_2} \frac{\tan \varphi_1 \sin \theta}{1 - \tan \varphi_1 \cos \theta} + \frac{1}{\tan \theta}; \quad B = L; \quad C = \frac{1}{\tan \theta}; \quad D = -\frac{\gamma}{\tan \theta}$ $E = -\frac{\tan \varphi_1 \sin \theta}{1 - \tan \varphi_1 \cos \theta} \left( c_1 \cot \theta - \frac{2c_2 \tan \varphi_2}{1 + \tan^2 \varphi_2} \right) + \frac{2c_2 \tan^2 \varphi_2}{1 + \tan^2 \varphi_2} + \gamma L - c_2 - c_1$
地裂缝上盘 考虑地震作用	$A = -\frac{\tan \varphi_2}{1 + \tan^2 \varphi_2} - \frac{1}{1 + \tan^2 \varphi_2} \frac{\tan \varphi_1 \sin \theta}{1 - \tan \varphi_1 \cos \theta} + \frac{1}{\tan \theta}; \quad B = L; \quad C = \frac{1}{\tan \theta}; \quad D = -\left( 1 + \alpha + \frac{3\alpha \tan \varphi_1 \sin \theta}{1 - \tan \varphi_1 \sin \theta} \right) \frac{\gamma}{\tan \theta}$ $E = (1 + \alpha) \gamma L - c_2 - c_1 + \frac{2c_2 \tan^2 \varphi_2}{1 + \tan^2 \varphi_2} - \frac{\tan \varphi_1 \sin \theta}{1 - \tan \varphi_1 \cos \theta} \left( c_1 \cot \theta - \frac{2c_2 \tan \varphi_2}{1 + \tan^2 \varphi_2} + 3\alpha \gamma L \right)$
地裂缝下盘 不考虑地震作用	$A = \frac{\tan \varphi_2}{1 + \tan^2 \varphi_2} + \frac{1}{1 + \tan^2 \varphi_2} \frac{\tan \varphi_1 \sin \theta}{1 - \tan \varphi_1 \cos \theta} - \frac{1}{\tan \theta}; \quad B = L; \quad C = -\frac{1}{\tan \theta}; \quad D = \frac{\gamma}{\tan \theta}$ $E = \gamma L + c_2 + c_1 - \frac{2c_2 \tan^2 \varphi_2}{1 + \tan^2 \varphi_2} + \left( c_1 \cot \theta - \frac{2c_2 \tan \varphi_2}{1 + \tan^2 \varphi_2} \right) \frac{\tan \varphi_1 \sin \theta}{1 - \tan \varphi_1 \cos \theta}$
地裂缝下盘 考虑地震作用	$A = \frac{\tan \varphi_2}{1 + \tan^2 \varphi_2} + \frac{1}{1 + \tan^2 \varphi_2} \frac{\tan \varphi_1 \sin \theta}{1 - \tan \varphi_1 \cos \theta} - \frac{1}{\tan \theta}; \quad B = L; \quad C = \frac{1}{\tan \theta}; \quad D = \left( 1 + \alpha + \frac{3\alpha \tan \varphi_1 \sin \theta}{1 - \tan \varphi_1 \sin \theta} \right) \frac{\gamma}{\tan \theta}$ $E = (1 + \alpha) \gamma L + c_2 + c_1 + \frac{2c_2 \tan^2 \varphi_2}{1 + \tan^2 \varphi_2} - \frac{\tan \varphi_1 \sin \theta}{1 - \tan \varphi_1 \cos \theta} \left( c_1 \cot \theta - \frac{2c_2 \tan \varphi_2}{1 + \tan^2 \varphi_2} + 3\alpha \gamma L \right)$

### 3 计算结果及分析

#### 3.1 计算参数选取

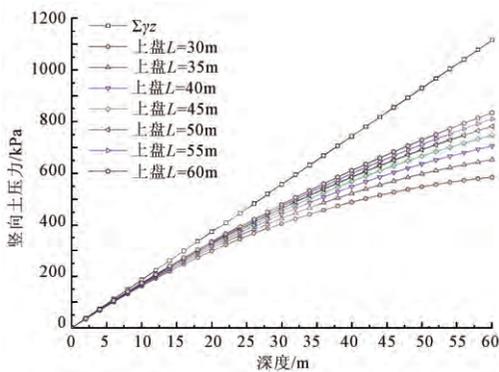
西安地铁工程多为浅埋暗挖隧道,其埋深多在10~20m之间,参考前人对西安地区这一深度附近地层以及地裂缝土样所做的土工试验<sup>[4-9]</sup>,以及西安地铁工程的经验,本次计算所选取的各计算参数如表2所示。将各计算参数带入计算并进行分析。

表2 计算参数

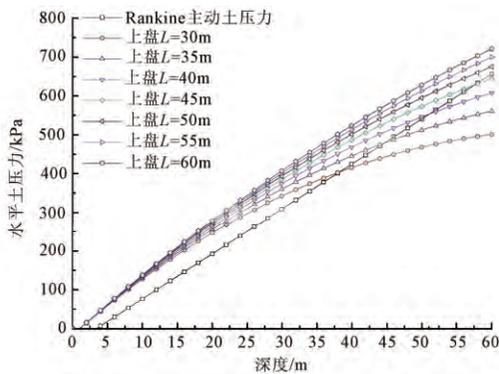
地层名称	内摩擦角 $\varphi/(\circ)$	黏聚力 $c/\text{kPa}$	地裂缝 倾角 $\theta/(\circ)$	重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$
地裂缝充填物	12	20	80	
土层	20	25		18.5

#### 3.2 土压力分布情况

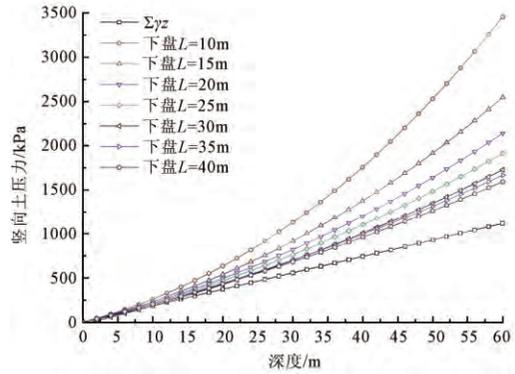
利用表2所示的参数计算了地裂缝上下盘不同深度处的竖向土压力 $\sigma_z$ 和水平土压力 $\sigma_x$ 随深度的变化情况。不考虑地震作用和取地震作用系数 $\alpha=0.1$ 时的计算结果分别如图8、9所示。可以看出,地裂缝上盘竖向土压力小于自重应力,水平土压力略大于Rankine主动土压力。而地裂缝下盘竖向土压力大于自重应力,水平土压力小于Rankine被动土压力。在地震的作用下,上盘的竖向土压力 $\sigma_z < (1+\alpha)\Sigma\gamma z$  < 下盘的 $\sigma_z$ 。



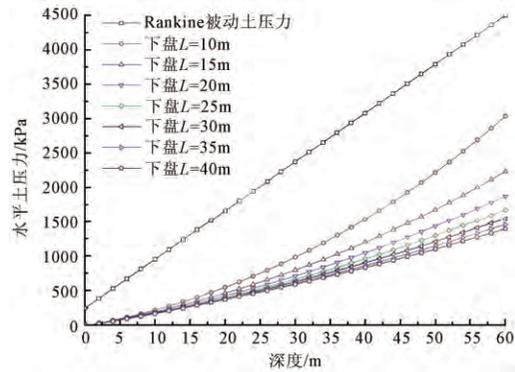
(a) 上盘竖向土压力 $\sigma_z$ 曲线



(b) 上盘水平土压力 $\sigma_x$ 曲线

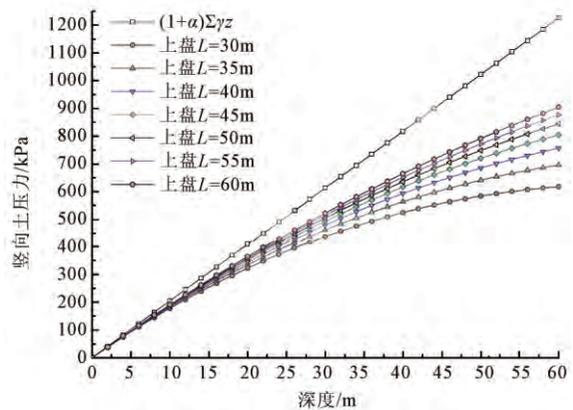


(c) 下盘竖向土压力 $\sigma_z$ 曲线

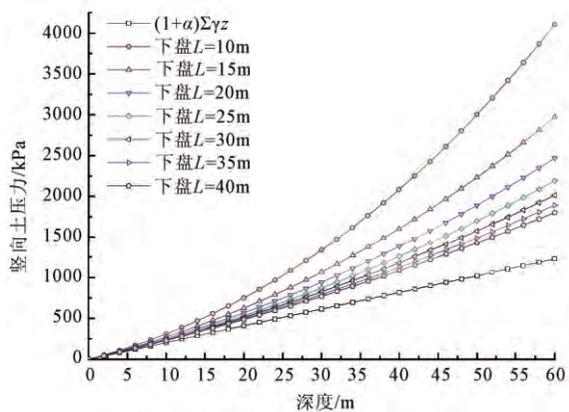


(d) 下盘水平土压力 $\sigma_x$ 曲线

图8 不考虑地震作用下地裂缝上下盘土压力随深度的变化



(a) 上盘竖向土压力



(b) 下盘竖向土压力

图9 地震作用下 $\alpha=0.1$ 时上下盘竖向土压力 $\sigma_z$ 曲线

### 3.3 沿地裂缝倾向方向的竖向土压力情况

取  $z = 5、10、15、20、25\text{m}$  几个对于浅埋地铁隧道和其他地下工程具有参考意义的深度进行计算,得到相同深度距地裂缝不同距离处的竖向土压力  $\sigma_z$  的分布,如图 10、11 所示。

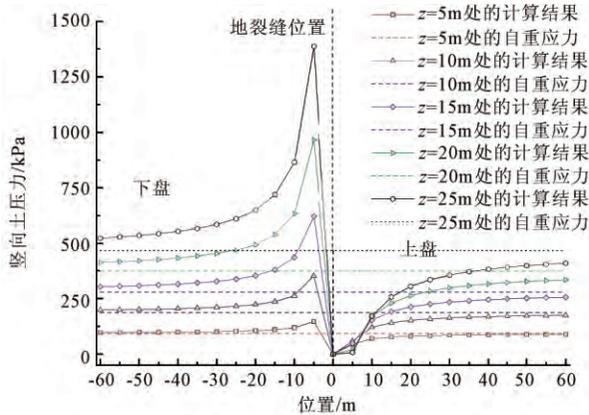


图 10 竖向土压力  $\sigma_z$  沿横向变化曲线

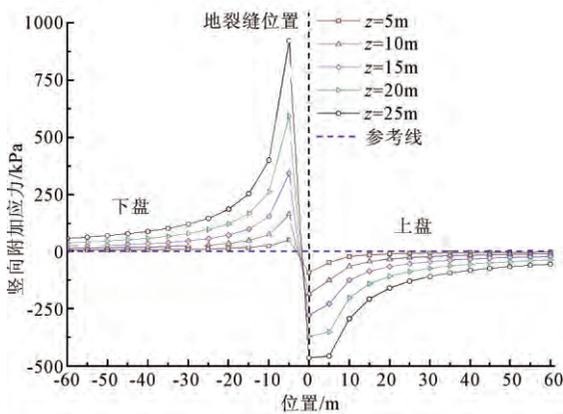


图 11 竖向附加应力  $\Delta\sigma_z$  横向变化曲线

通过图 10、11 可以看出,无论是位于地裂缝上盘或下盘,距离地裂缝较远处的土体所受到的竖向土压力  $\sigma_z$  趋向于该深度处上覆土层的自重应力,且附加应力均趋向于 0。即:

$$\lim_{L \rightarrow \infty} \sigma_z = \sum \gamma z \quad (25)$$

$$\lim_{L \rightarrow \infty} \Delta\sigma_z = 0 \quad (26)$$

地裂缝上盘一定范围内竖向土压力  $\sigma_z$  明显小于其所受到的上覆土体的自重应力,且距离地裂缝越近  $\sigma_z$  减小越明显。上盘距地裂缝较近处竖向土压力甚至出现负值的情况。由于土体抗拉强度很小,因此当计算得到  $\sigma_z < 0$  时,认为  $\sigma_z = 0$ 。距离地裂缝越远  $\sigma_z$  越接近上覆土层自重应力,且随着埋深的增大,上盘竖向土压力的影响范围和减小值也就越明显。

地裂缝下盘距离地裂缝一定范围内的土体所受到的  $\sigma_z$  明显大于其所受到的上覆土体的自重应

力,并且随着埋深的增大,下盘土体所受到的竖向土压力的增大值和影响范围也就越明显。地裂缝下盘竖向土压力的影响范围略小于上盘,但差别不大。根据本文推导得到的公式进行计算,相同地裂缝上盘竖向土压力减小值小于地裂缝下盘竖向土压力增加值。

本文公式的计算结果与文献 [4] 模型试验的变化规律基本一致,即在垂直地裂缝走向的方向上地裂缝附近的应力场存在“下盘原始应力区、下盘应力增强区、上盘应力降低区和上盘原始应力区”4 个分区。

## 4 结论

通过取地裂缝上下盘的土条单元,根据极限平衡条件,考虑改进的侧压力系数,推导得到了地裂缝上下盘的应力表达式,对其进行了计算分析,得到以下结论:

- 1) 在垂直地裂缝走向的方向上地裂缝附近的应力场存在“下盘原始应力区、下盘应力增强区、上盘应力降低区和上盘原始应力区”4 个分区。随着埋深的增加,上下盘土体受到地裂缝活动引起的竖向附加应力和影响范围也会有明显的增加。
- 2) 竖向土压力  $\sigma_z$  随地震系数  $\alpha$  的增大而增大,且地震作用下上盘的  $\sigma_z < (1 + \alpha) \sum \gamma z < \text{下盘的 } \sigma_z$ 。
- 3) 对于位于上盘的近距离平行于地裂缝的地铁隧道而言,按照规范中竖向荷载为上覆土体的自重应力来进行设计是安全的。

## 参考文献

- [1] 贺凯,彭建兵,黄强兵,等. 近距离平行通过地裂缝的地铁隧道模拟试验研究. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(增2): 4086~4095
- [2] 顾安全. 上埋式管道及洞室垂直土压力的研究. 岩土工程学报, 1981, 3(1): 3~15
- [3] 孟振江,彭建兵,黄强兵,等. 三类勘察场地地裂缝活动对地铁隧道的影响. 交通运输工程学报, 2017(2): 41~51
- [4] 黄强兵,杨涛,王震,等. 跨地裂缝地铁隧道竖向地层压力计算方法探讨. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(8): 1705~1711
- [5] Marston A, Anderson A O. The theory of loads on pipes in ditches and tests of cement and clay drain tile and sewer (下转第 22 页)

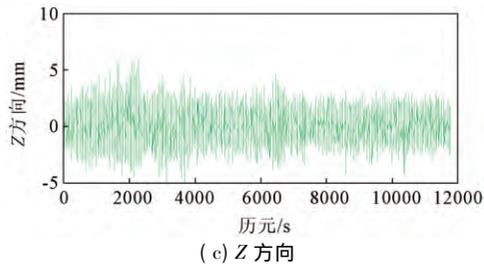


图4 018j X、Y、Z三个方向的改正误差

由图4可以看出,改正后的误差除个别时段外,其它都在5mm之内,满足规范要求。

#### 4 结束语

1) 在本算例中,多路径效应影响最大可以达到2cm,可见在变形监测中,多路径误差是必须考虑的因素。

2) 运用移动平均法去噪时,移动周期越大去噪和提取多路径误差序列的效果越明显,但对于两端的数据无法改正,导致已有的数据利用率较低。

3) 运用小波去噪时,分解层数难以确定,从改正后的误差折线图中可以看出,存在着明显的端部效应<sup>[10]</sup>,如何通过程序设计在小波基函数和阈值确定的前提下,自动选取最优的分解层数和消除端部效应是接下来将要开展的工作。

4) 在本算例分析中,对移动平均法和小波去噪的效果进行对比,尤其在Y、Z两个方向,可以发现小波去噪的效果明显优于移动平均法。

#### 参考文献

- [1] 袁林果,黄丁发,丁晓利,等. GPS载波相位测量中的信号多路径效应影响研究. 测绘学报, 2004, 33(3): 24~29
- [2] 陈亮亮,郭杭,吴代赦. 移动平均法用于GPS多路径效应的分析. 工程勘察, 2008, (3): 61~65
- [3] 黄声享,刘经南. GPS变形监测系统中消除噪声的一种有效方法. 测绘学报, 2002, 31(2): 104~107
- [4] 熊永良,丁晓利,黄丁发,等. 基于小波变换的单历元算法及其在结构振动监测中的应用研究. 测绘学报, 2005, 34(3): 202~207
- [5] 黄丁发,陈永奇,丁晓利,等. GPS高层建筑物常荷载振动测试的小波分析. 振动与冲击, 2001, 20(1): 12~15
- [6] 黄声享,刘经南,柳响林. 小波分析在高层建筑动态监测中的应用. 测绘科学, 2003, 32(2): 153~157
- [7] 王波,张书毕,武江伟,等. 基于小波技术的GPS单历元形变信号降噪研究. 测绘科学, 2008, 33(S3): 23~24
- [8] 王坚,高井祥,孙祥中. GPS单历元形变信号的小波降噪. 测绘科学, 2004, 29(1): 24~25
- [9] 伊廷华,李宏男,伊晓东,等. 基于自适应噪声抵消与小波滤波的GPS监测误差分析. 武汉大学学报(信息科学版), 2006, 31(11): 995~998
- [10] 王德军,熊永良,徐韶光. 利用小波去噪的高精度动态单历元定位算法. 武汉大学学报(信息科学版), 2015, 40(6): 779~784
- [11] 党星海,赵丽洁,孔令杰,等. 小波分析在GPS振动监测数据中的应用. 大地测量与地球动力学, 2013, 33(2): 147~150
- [12] 钟萍,丁晓利,郑大伟,等. GPS结构振动监测数据滤波方法及其性能实验研究. 测绘学报, 2007, 36(1): 31~36, 42
- [13] 黄声享,李沛鸿,杨保岑,等. GPS动态监测中多路径效应的规律性研究. 武汉大学学报(信息科学版), 2005, 30(10): 877~880
- [14] 袁德宝. GPS变形监测数据的小波分析与应用研究: [学位论文]. 北京:中国矿业大学(北京), 2009
- [15] 胡薛毅,黄声享,庞辉. 变形监测数据小波去噪分解尺度确定方法. 测绘地理信息, 2017, 42(2): 44~48
- [16] 吴杰,苗恒亚,左工,等. 大桥GPS动态监测去噪方法. 测绘科学, 2016, 41(10): 106~110, 141
- [17] 于帅,刘超,李盟盟,等. EMD-Wavelet-HCA耦合模型及其在GPS坐标序列降噪中的作用. 测绘科学, 2016, 33(2): 139~144
- [18] 刘超,王坚,胡洪,等. 动态变形监测多路径实时修正模型研究. 武汉大学学报:信息科学版, 2010, 35(4): 481~490

(上接第6页)

- pipe. Ames: Iowa State College of Agriculture and Mechanic Arts, 1913. 28~39
- [6] Krynine D P. Discussion of 'Stability and stiffness of cellular offerdams' by Karl Terzaghi. Transactions of the American society of civil Engineering, 1945, 110(1): 1120~1186
- [7] Liu Nina, Huang Qiangbin, Ma Yujie et al. Experimental study of a segmented metro tunnel in a ground fissure area. Soil Dynamic & Earthquake Engineering, 2017, 100: 410~416
- [8] 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. 地球科学与环境学报, 2009, 31(1): 85~88
- [9] 李新生,王万平,王静,等. 西安地裂缝两盘地层岩土物理力学性质研究. 水文地质工程地质, 2008, 35(2): 58~61