

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2020.01.018

# 基于滑移线网络法的黄土隧道坍塌拱分析及其 承载评价\*

白维仕<sup>1</sup>, 李荣建<sup>1</sup>, 赵学勳<sup>2</sup>, 刘军定<sup>1</sup>, 邹泽林<sup>1</sup>

(1. 西安理工大学岩土工程研究所, 陕西 西安 710048; 2. 西安公路研究院, 陕西 西安 710065)

**摘要:** 针对隧道稳定分析计算方法复杂、计算量大等问题, 基于滑移线场提出一种简洁方便的图解法具有重要的理论意义和工程意义。首先发展完善了无支护黄土隧道全断面围岩滑移线网络图分析方法, 然后, 通过MATLAB实现了滑移线网络法的可视化分析程序, 结合试验性黄土隧道塌落监测成果验证了无支护黄土隧道全断面围岩滑移线网络图分析程序, 最后, 评价分析了黄土抗剪强度内摩擦角和黏聚力对黄土隧洞围岩坍塌范围及土拱极限承载力的影响。结果表明: 黄土土拱极限承载力随黏聚力的增大而增大且敏感程度升高, 黄土土拱极限承载力随摩擦角的增大而减小且敏感程度降低, 坍塌范围随摩擦角的增大而减小。

**关键词:** 黄土隧道; 坍塌拱; 滑移线场理论; 黄土隧道围岩滑移线网络法; 敏感性

**中图分类号:** TU443    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1672-2132(2020)01-0132-07

## Based on Loess Arch Sliding Line Field Visualization Program Design and Parameter Sensitivity Analysis

BAI Weishi<sup>1</sup>, LI Rongjian<sup>1</sup>, ZHAO Xuemeng<sup>2</sup>, LIU Junding<sup>1</sup>, ZOU Zelin<sup>1</sup>

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. Institute of Public Road in Xi'an, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** Based on slip line field to give a simple and convenient graphic method it have great theoretical and engineering significance aiming at the problems of complex calculation method and large amount of calculation in tunnel stability analysis. Firstly, the method of the whole section slip line field at unsupported in loess tunnel was developed and improved. Secondly, the visual analysis program of the slip line network method is realized by MATLAB. Combined with the test results of the experimental loess tunnel collapse, the analysis program of the method of the whole section slip line field at unsupported in loess tunnel was verified. Finally, the influence of the internal friction angle and cohesion of the shear strength of loess on the collapse range of surrounding rock and the ultimate bearing capacity of soil arch in loess tunnel are evaluated. The results show that the ultimate bearing capacity of loess arch increases with the increase of cohesion also the sensitivity. The ultimate bearing capacity

\* 收稿日期: 2019-02-15; 修回日期: 2020-01-02

基金项目: 陕西省黄土力学与工程重点实验室项目(14JS064)资助

作者简介: 白维仕(1994-), 男, 硕士研究生。主要从事隧道与边坡防灾分析。Email: 1059296512@qq.com

通讯作者: 李荣建(1969-), 男, 教授, 博导, 博士。主要从事黄土力学、岩土工程抗震与边坡工程研究。

Email: lirongjian@xaut.edu.cn

ty of loess arch decreases with the increase of friction angle then the sensitivity decreases, and the sliding range decreases with the increase of friction angle.

**Keywords:** loess tunnel; ground arch; slip line field theory; method of slip line field in loess tunnel; susceptibility

## 引言

随着我国中西部基础建设高速发展和一带一路快速推进,各类工程中黄土隧道数量日益增多,促进了黄土隧道分析计算理论的快速发展。目前,隧道分析计算理论比较有代表性的是经典理论和有限元模拟<sup>[1]</sup>。汪大海等<sup>[2]</sup>运用有限元模拟程序进行隧道稳定计算分析,分析了不完全拱效应影响的成果,但此方法存在建模复杂、模拟过程中理论计算繁琐等问题。邓伟等<sup>[3]</sup>针对新奥法建立了适用于新奥法浅埋隧道围岩压力的计算模型,但此方法仍存在上述问题且计算结果不直观。

由于基于弹塑性滑移线场理论的图解法具有计算过程简单、直观等特点<sup>[4]</sup>,朱以文等<sup>[5]</sup>提出了滑移线方向场数值模拟的具体方法和由滑移线方向场追踪滑移线的方法,对经典滑移线场进行了优化和普及。龚文惠等<sup>[6]</sup>采用滑移线场理论确定滑裂面,并结合动力有限单元法,提出了一种地震作用下土质边坡稳定性的分析方法。程彩霞等<sup>[7]</sup>基于统一滑移线场理论分析了边坡的承载力,给出了钝角边坡和无限半空间土的极限荷载求解公式,表明了弹塑性滑移线场在工程分析计算中有极大的前景和研究意义。

为了将弹塑性滑移线场推广到隧道围岩稳定性评价中,赵学勤等<sup>[8]</sup>基于试验性黄土隧道坍塌区域扩展规律提出滑移线网络方法,在隧道分析领域中探索滑移线网络分析的应用思路,该方法奠定了基于黄土隧道坍塌区的滑移线网络方法基础。但一方面由于可视化程序的分析方法尚未有效研究,另一方面由于缺乏强度指标在该方法中的敏感性分析,导致在黄土隧道工程中无法推广应用。

因此,本文基于试验性黄土隧道坍塌区域扩展规律提出的滑移线网络方法,进一步发展完善无支护黄土隧道全断面围岩滑移线网络图分析方法,并开发验证;最后针对黄土强度指标进行敏感性分析

与评价,以期推动无支护黄土隧道全断面围岩滑移线网络图分析方法在黄土隧道工程中广泛应用。

## 1 黄土隧道全断面围岩滑移线网络图分析方法原理

在塑性状态下,平面应变问题中,平面上每一点都存在两个相交的剪切破坏面,把各点的剪切破坏面连接起来,就可以得到两簇滑移线,如图1中曲线 $\alpha-\alpha$ 和 $\beta-\beta$ ,滑移线上的任一点的切线方向为相应的滑移面方向<sup>[9]</sup>。

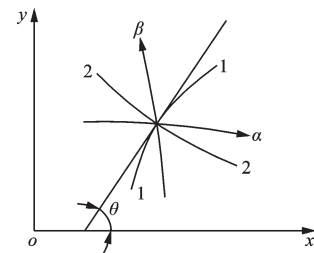


图1 滑移线和主应力迹线

Fig.1 Slip lines and principal stress traces

滑移线各点的方向与主应力迹线方向有关。若把表示各点主应力方向的线段连接起来,就得到两簇相互正交的曲线,称为主应力迹线,如图1中的曲线1—1和2—2。以第一主应力 $\sigma_1$ 的迹线为基线,顺时针方向与基线成锐角的称为 $\alpha$ 线,逆时针方向与基线成锐角的称为 $\beta$ 线。对于M—C材料,两簇滑移线相互间夹角为 $2\mu=\pi/2-\varphi$ ;与主应力迹线的夹角为 $\mu=\pi/4-\varphi/2$ 。其中, $\varphi$ 为材料的内摩擦角<sup>[9]</sup>。

用经典的滑移线场法求解应力时,两簇滑移线构成曲线坐标 $(S_\alpha, S_\beta)$ ,在 $S_\alpha, S_\beta$ 曲线坐标系中求下列方程:

$$\frac{dy}{dx} = \tan(\theta - \mu) \quad (\alpha \text{线}) \quad (1)$$

$$\frac{dy}{dx} = \tan(\theta + \mu) \quad (\beta \text{线}) \quad (2)$$

$$-\sin(2\mu) \frac{\partial P}{\partial S_a} + 2R \frac{\partial \theta}{\partial S_a} + \gamma \left[ \sin(2\mu) \frac{\partial x}{\partial S_a} + \cos(2\mu) \frac{\partial y}{\partial S_a} \right] = 0 \quad (3)$$

$$\sin(2\mu) \frac{\partial P}{\partial S_\beta} + 2R \frac{\partial \theta}{\partial S_\beta} + \gamma \left[ -\sin(2\mu) \frac{\partial x}{\partial S_\beta} + \cos(2\mu) \frac{\partial y}{\partial S_\beta} \right] = 0 \quad (4)$$

式中,  $P$  为平均应力;  $R$  为应力圆半径, 对于 M-C 材料,  $R = P \sin \varphi + c \cos \varphi$ ;  $\gamma$  为容重;  $\theta$  为第一主应力  $\sigma_1$  的方向与  $x$  轴的夹角。

由于滑移线本身也是待求的, 所以只能用数值解对式(1)~(4)用差分法联立求解, 由于是曲线坐标, 所以由此所得差分方程为非线性的, 除了极少数简单情况外, 目前只能用迭代法求解<sup>[10]</sup>。

基于滑移线场理论确定边坡滑裂面已经得到广泛的应用, 常规边坡滑移线场如图 2 所示。

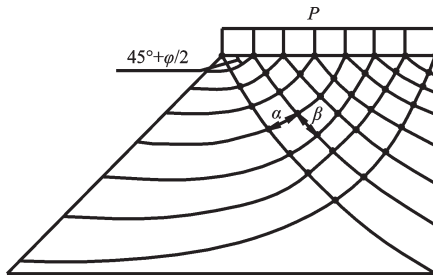


图 2 边坡滑移场  
Fig.2 Slope slip field

在大量隧道病害调查中, 无支护黄土隧道围岩坍塌过程是由边墙和拱脚开始破坏, 坍塌范围逐步扩展到拱顶处(图 3)。如果将隧道坑道以垂直对称截面分成两部分, 取坍塌拱半拱进行计算分析, 由于此半拱下面为临空面, 当顺时针旋转 90°时, 则在理论上可以形成一种边坡极其相似的一种滑移线分析模式, 如图 4 所示。

因此, 结合松散介质极限理论和黄土隧道病害调查分析, 针对隧道黄土拱承载力稳定分析可以提出无支护黄土隧道全断面围岩滑移线网络法(图 5)。

无支护黄土隧道全断面围岩滑移线网络法以滑移线为理论核心, 针对黄土隧道病害调查中的塌落轮廓, 将滑移线“以直代曲”进行一定程度的简化, 使得计算所得到的围岩自承载力十分接近土体

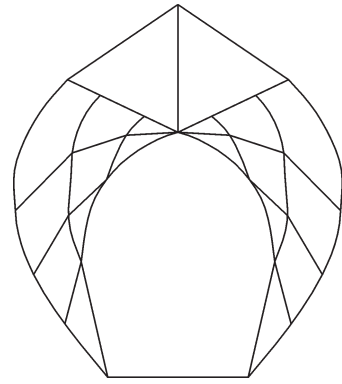


图 3 无支护黄土隧道全断面围岩滑移线网络图  
Fig.3 Network diagram of surrounding rock sliding line in full section of unsupported loess tunnel

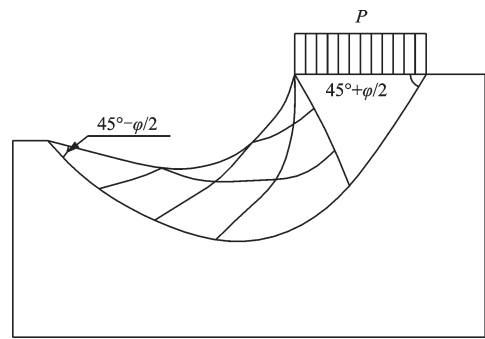


图 4 隧道坑道半拱旋转 90°时滑移网络线分析模式  
Fig.4 Tunnel semi arch tunnel rotate 90° slip line network analysis model

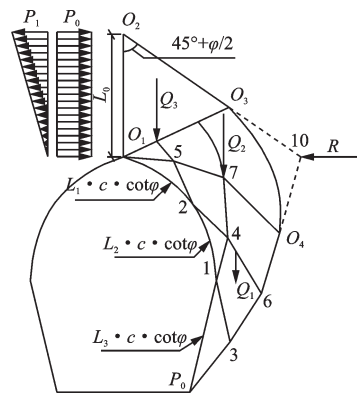


图 5 围岩滑移线网络图  
Fig.5 The sliding line net of wall rock finite element

塑性极限分析中的下限解。

无支护黄土隧道全断面围岩滑移线网络法具体分析步骤如下:

(1) 被动应力区的坍塌拱滑移线绘制过程: 以三个半径比例为  $1 : \sin \varphi : \sin^2 \varphi$  作一组同心圆, 分别称为极圆、顶圆及面圆, 以此构成特征圆。在特征圆中作平行于坑道表面侧墙段的直线, 与顶圆交于

A、B两点,又与面圆相切,通过圆心O作这条直线的垂直线,与极圆相交Q点,从Q点以任意比例尺代表内聚力,且方向通过圆心O点,与顶圆交于D点,连接点A和点D,连接B点和D点,这两条线为二组滑动面的方向。同理可以得到整个被动应力状态区的围岩滑塌线。

(2)过渡区的坍塌拱滑移线绘制过程:可用对数螺旋线 $r=r_0 \times e^{\theta \times \tan\varphi}$ 作出。由于在半拱顶部截面上所承受的载荷位于垂直方向,得到过渡区与主动应力区的直线边界,且与垂直方向的夹角为 $45^\circ + \varphi/2$ ,由极限平衡理论可得到剪切方向与垂直方向的夹角亦为 $45^\circ + \varphi/2$ ,进而得到过渡区与主动应力区的边界方向范围,绘制出过渡区。

(3)主动应力区的坍塌拱滑移线绘制过程:由已绘制的过渡区和主动应力区的边界,运用三角形定理可计算出主动应力区上边界,至此整个围岩滑塌区绘制完成。

(4)根据力多边形图解得出由黏聚力作为土拱表面上的均布载荷在 $O_1-O_2$ 面上产生的承载力 $P_0$ 。

$$P_0 = \overline{L_{O_1,6}} \times c \times \cot\varphi + \overline{L_{47}} \times c \times \cot\varphi + \overline{L_{25}} \times c \times \cot\varphi + \overline{R_1} \quad (5)$$

(5)在考虑黄土体积力的条件下,计算三个坍塌区域内的体积力,再次根据力多边形图解法求出坍塌区域的体积力在垂直面产生的荷载

$$P_0 = \overline{Q_1} + \overline{Q_2} + \overline{Q_3} + \overline{R_2} \quad (6)$$

这一荷载力在隧道的情况下, $P_1$ 为拉力, $\vec{R}$ 为对数螺旋面上的反力可求解。

(6)根据承载力 $P_0$ 与荷载 $P_1$ 对围岩的物理作用,可以得出土拱的极限水平承载力:

$$P = P_0 - P_1 \quad (7)$$

式中, $P_0$ 为土的黏聚力在拱顶截面产生的压力; $P_1$ 为土的体积力在拱顶截面产生的拉力。

值得注意的是,由于直接采用弹塑性滑移线网络法绘制围岩滑塌面存在耗时长、人工绘制精确度不高等问题,使得对黄土隧道预测滑塌面和其极限承载力行之有效的方法无法在工程 and 实际中方便地展开使用。因此本文通过研发可视化分析程序实现了黄土隧道全断面围岩滑移线网络图分析方法。

## 2 黄土隧道坍塌实测与程序计算验证

针对单车道长度为250 m、穿过 $Q_1$ 土层的试验性黄土隧道监测,赵学勤等<sup>[11]</sup>分析了隧道病害发生过程。在5年监测期间,隧道顶部土拱自重逐步转移到隧道两侧,整个应力场重新分布,隧道径向应力为零,环向应力增加,塌落过程由边墙和拱脚开始破坏,滑塌范围逐步扩展到拱顶处,土拱逐步趋于极限平衡状态。监测中无衬砌黄土隧道滑塌发展过程如图6所示。

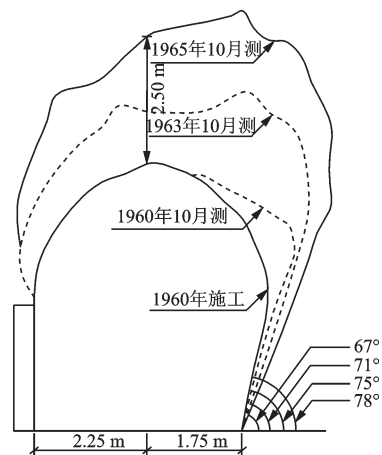


图6 监测土拱坍塌逐步发展

Fig.6 After a period of soil arching slump gradually developed particle sizes

基于无支护黄土隧道全断面围岩滑移线网络法,本文研发了MATLAB可视化分析程序,实现了黄土隧道全断面围岩滑移线网络图分析方法,本程序通过可视化窗口界面展示计算、逐步绘制围岩滑移线图形,输出结果可以判断坍塌区域和坍塌拱的极限承载力。可视化分析程序的输入参数为 $c$ 值、 $\varphi$ 值、 $\gamma$ 值、隧道开挖断面高跨比,输出结果为坍塌范围及半拱的极限承载力。其流程如图7所示。

针对试验性黄土隧道滑塌段取得黄土重度值为 $19.6 \text{ kN/m}^3$ ,强度参数 $c$ 为 $9 \text{ t/m}^2$ 、 $\varphi$ 为 $30^\circ$ ,高跨比为5:4,本文研发程序采用试验性黄土隧道进行分析计算得到围岩滑移线网络图(图8),其主动应力区边界OL长度为2.590 2 m,且与监测中无衬砌黄土隧道垮塌发展外轮廓十分接近,进而验证了本程序的准确性与适用性。

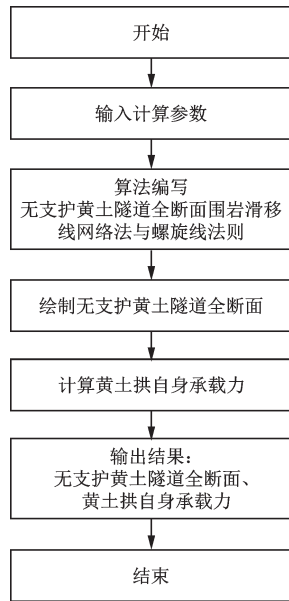


图7 可视化程序流程

Fig.7 Visual program flow chart

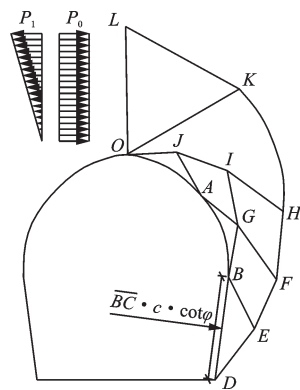


图8 程序计算坍塌发展

Fig.8 Program forecast slump development figure

### 3 强度指标对黄土隧道承载性的敏感性分析与评价

本程序基于黄土隧道围岩主要强度指标  $c$  值、 $\varphi$  值进行敏感性分析。在一种工况下(高跨比为 5:4),本程序  $c$  值拟定范围为 9~49  $t/m^2$ ,  $\varphi$  值拟定范围为  $10^\circ \sim 35^\circ$ 。通过单一变量原则进行程序计算分析,强度指标  $c$ 、 $\varphi$  值对隧道坍塌线和黄土拱水平极限承载力值的影响如图 9~图 11 所示。

由图 9 可知,当  $c$  值不变时,坍塌拱线随  $\varphi$  值的减小而向外延伸,坍塌范围将随  $\varphi$  值的减小而增大,即坍塌破坏区域随  $\varphi$  值减小而增大,坍塌破坏区域随  $\varphi$  值增大而减小。

基于单一变量法则运用本程序进行强度指标

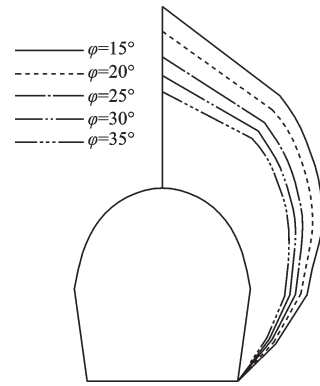


图9 不同  $\varphi$  值情况下的坍塌拱线

Fig.9 Ground arch lines with different values of  $\varphi$

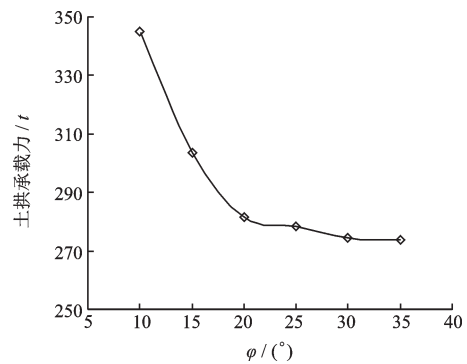


图10 不同  $\varphi$  值情况下的土拱承载力

Fig.10 Soil arch bearing capacity under different values of  $\varphi$

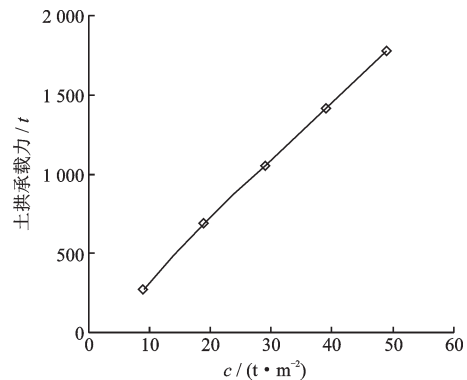


图11 不同  $c$  值情况下的土拱承载力

Fig.11 Soil arch bearing capacity under different values of  $c$

敏感性计算分析,输入参数  $\varphi$  取值分别为  $10^\circ$ 、 $15^\circ$ 、 $20^\circ$ 、 $25^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $35^\circ$ ,  $c$  值取为恒定值 9  $t/m^2$ ,程序计算所得围岩自身承载力对应为:345 t、303 t、281 t、278 t、274 t、273 t(图 10)。通过分析可以得到输入参数  $\varphi$  的敏感性规律:如前所述坍塌破坏区域随  $\varphi$  值减小而增大,由于基于黄土隧道全断面围岩滑移线网络法程序计算的是坍塌破坏区域的承载能力,所以坍塌破坏区域变大会导致相应的承载力变大,即随着



较小的  $\varphi$  值导致较大的坍塌破坏区域,而较大的坍塌破坏区域需要较大的破坏荷载,因而综合表现为土拱的承载力随  $\varphi$  值减小而增大。

基于单一变量法则运用本程序进行强度指标敏感性分析,输入参数  $c$  取值为 9、19、29、39、49 t/m<sup>2</sup>,  $\varphi$  值为 30°,程序计算所得围岩自身承载力对应为: 274 t、638 t、1 011 t、1 364 t、1 722 t(图 11)。进而得到其敏感性规律:由于基于黄土隧道全断面围岩滑移线网络法程序计算中:

$$P = \frac{\overline{L_{0.6}} \times c \times \cot\varphi + \overline{L_{47}} \times c \times \cot\varphi + \overline{L_{25}} \times c \times \cot\varphi}{\overline{R_1} - \overline{Q_1} - \overline{Q_2} - \overline{Q_3} - \overline{R_2}} \quad (8)$$

所以在一定范围内, $c$  值与土拱承载力大致呈线性变化,这一规律变化表明了  $c$  值对土拱承载力有较强的敏感性。

## 4 结 论

(1) 基于弹塑性状态下经典滑移线理论,梳理了滑移线网络图分析理论基础,发展完善了基于无支护黄土隧道全断面围岩的滑移线网络图方法,这种方法将经典滑移线场引入了隧道领域且可以直观有效地反映黄土隧道潜在坍塌区域。

(2) 通过对比分析程序绘制的滑移线网络图和试验性隧道实测坍塌区域的差异,验证了分析程序的可靠性与稳定性,表明分析程序可有效且直观地预测黄土隧道潜在坍塌区,同时分析程序提高了滑移线网络图的应用效率,有利于滑移网络图在工程实际中的使用,为黄土隧道工程提供了一种可行且高效的隧道稳定分析计算方法。

(3) 评价了黄土黏聚力和内摩擦角对黄土隧道土拱滑塌线和极限承载力的影响。滑塌范围随内摩擦角的增大而减小;土拱极限承载力随黏聚力的增大而增大;土拱极限承载力初期随内摩擦角的增大而减小,且内摩擦角增大一定程度时土拱承载力的敏感性减弱。

## 参考文献:

[1] 《中国公路学报》编辑部. 中国隧道工程学术研究综述·2015[J]. 中国公路学报, 2015, 28(5): 1-65.  
Editorial Department of China Journal of Highway and Transport. Review on China's tunnel engineering research: 2015[J]. China Journal of Highway and Trans-

port, 2015, 28(5): 1-65. (in Chinese)

[2] 汪大海, 贺少辉, 刘夏冰, 等. 基于主应力旋转特征的浅埋隧道上覆土压力计算及不完全拱效应分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(6): 1 284-1 296.  
Wang D H, He Sh H, Liu X B, et al. A modified method for determining the vertical loading above shallow tunnels considering the distribution of the principal stress rotation and the partially mobilized arching effect [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 38(6): 1 284-1 296. (in Chinese)

[3] 邓 伟, 葛允雷, 杨果林, 等. 基于新奥法浅埋隧道的围岩压力计算方法[J]. 中外公路, 2018, 38(5): 148-150.  
Deng W, Ge Y L, Yang G L, et al. Calculation method of surrounding rock pressure based on neo-austrian shallow buried tunnel[J]. Journal of China & Foreign-Highway 2018, 38(5): 148-150. (in Chinese)

[4] 李 靖, 周欣华, 党进谦. 黄土边坡稳定性图解法[J]. 岩土工程学报, 1998(4): 43-46.  
Li J, Zhou X H, Dang J Q. Graphic method for the stability of loess slopes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998(4): 43-46. (in Chinese)

[5] 朱以文, 吴春秋, 蔡元奇. 基于滑移线场理论的边坡滑裂面确定方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2005(15): 2 609-2 616.  
Zhu Y W, Wu Ch Q, Cai Y Q. Determination of slip surface in slope based on theory of slip line field[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005(15): 2 609-2 616. (in Chinese)

[6] 龚文惠, 陈训龙, 邱金伟, 等. 基于滑移线场理论的地震作用下土质边坡稳定性分析[J]. 岩土力学, 2017, 38(6): 1 733-1 738.  
Gong W H, Chen X L, Qiu J W, et al. Seismic stability analysis of soil slope using theory of slip line field[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(6): 1 733-1 738. (in Chinese)

[7] 程彩霞, 赵均海, 魏雪英. 边坡极限荷载的统一滑移线解与有限元分析[J]. 工业建筑, 2005(10): 33-35, 46.  
Cheng C X, Zhao J H, Wei X Y. Solution of ultimate load for slope by unified slip line field method and finite element method [J]. Industrial Construction, 2005, (10): 33-35, 46. (in Chinese)

[8] 赵学勤, 王 璐. 黄土拱作用机理剖析[J]. 岩土力学, 2009, 30(增 2): 9-12.  
Zhao X M, Wang L. Analysis of mechanism of loess arching [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(Sup 2): 9-12. (in Chinese)

[9] 龚晓南. 土工计算机分析[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015, 28(5): 1-65. (in Chinese)

版社, 2000.

Gong X N. Computational analysis of soil engineering [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2000. (in Chinese)

[10] 龚晓南. 土塑性力学[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1990.

Gong X N. Plasticity mechanics of soil [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 1990. (in Chinese)

[11] 赵学勤, 倪玉山. 黄土隧道围岩变形的长期观测及其

稳定性的分析[C]//中国土木工程学会隧道及地下工程分会第十二届年会, 2002.

Zhao X M, Ni Y Sh. Long-term observation and stability analysis of surrounding rock deformation of loess tunnel [C]//Tunnel and Underground Works Branch of China Civil Engineering Society in 12th Annual Meeting, 2002. (in Chinese)

(本文责编: 池营营)



(上接第 124 页)

[7] 孟上九, 袁晓铭. 建筑物不均匀震陷简化分析方法[J]. 地震工程与工程振动, 2003, 23(2):102-107.

Meng Sh J, Yuan X M. Simplified analytical method for earthquake-induced differential settlement of buildings [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2003, 23(2):102-107. (in Chinese)

[8] Shahrour I, Khoshnoudian F, Sadek M, et al. Elastoplastic analysis of the seismic response of tunnels in soft soils[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2010, 25(4):478-482.

[9] 毕丽思, 陈小芳, 卢帮华. 基于高密度钻孔揭露的广州城区软土分布特征及震陷预测[J]. 地震工程学报, 2018, 40(5): 1 026-1 033.

Bi L S, Chen X F, Lu B H. Distribution features of soft soil and the prediction of seismic subsidence in Guangzhou urban area based on high-density borehole [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2018, 40(5): 1 026-1 033. (in Chinese)

[10] 软土地区岩土工程勘察规程: JGJ 83—2011 [S]. 北

京: 中国建筑工业出版社, 2011.

Specification for geotechnical investigation in soft clay area: JGJ 83—2011 [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2011. (in Chinese)

[11] 张久麒, 孙 锐, 袁晓铭, 等. 软土残余应变势简化计算公式及参数分析[J]. 地震工程与工程振动, 2017, 37(5):103-108.

Zhang J Q, Sun R, Yuan X M, et al. The simplified formula for calculating the permanent strain potential of soft soil and parameter analysis [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2017, 37(5): 103-108. (in Chinese)

[12] 谢君斐, 石兆吉, 郁寿松, 等. 液化危害性分析[J]. 地震工程与工程振动, 1988, 8(1): 63-79.

Xie J F, Shi Zh J, Yu Sh S, et al. Hazard analysis of liquefaction [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1988, 8(1): 63-79. (in Chinese)

(本文责编: 池营营)