

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2016.03.015

黄土隧道围岩压力的一种极限平衡理论计算方法研究

吴飞洁¹, 邵生俊^{1,2}, 余芳涛^{1,2}

(1. 西安理工大学 岩土工程研究所, 陕西 西安 710048; 2. 陕西省黄土力学与工程重点实验室, 陕西 西安 710048)

摘要: 隧道围岩压力的计算方法研究是隧道工程支护结构设计中的关键问题。本文依据黄土隧道围岩的破坏模式调查和围岩压力的现场实测结果, 提出了黄土隧道破坏模式, 进而按照隧道上方土体与侧面楔形体的极限平衡条件, 解析得到一种适用于黄土隧道的围岩压力计算方法, 并将实际黄土隧道的围岩压力计算结果, 与以往土质隧道的 5 种常用方法计算结果进行对比。研究结果表明: 该方法的计算结果介于以往围岩压力计算结果的最大值与最小值之间, 且随着埋深增大存在峰值, 该峰值可用于判断深浅埋临界深度, 并且随黄土强度指标变化, 围岩压力计算结果仍处于前述变化范围内。

关键词: 极限平衡理论; 黄土隧道; 破坏模式; 围岩压力

中图分类号: TU43

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2016)03-0338-05

Study of the calculation method for surrounding rock pressure in loess tunnel based on the limit equilibrium theory

WU Feijie¹, SHAO Shengjun^{1,2}, SHE Fangtao^{1,2}

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

2. Shaanxi Province Key Laboratory of Loess Mechanics and Engineering, Xi'an 710048, China)

Abstract: The calculation method for surrounding rock pressure is a key problem in designing the supporting structure of tunnel engineering. Based on the failure mode of loess tunnel and the field measuring results of surrounding rock pressure, a new failure mode is proposed in this paper. According to the limit equilibrium condition of the soil mass upward loess tunnel and the soil mass on both sides, the calculation method is derived. A comparison between the new method and five common methods is conducted by calculating the surrounding rock pressure of the same loess tunnel, revealing that result by the new method is between the maximum value and the minimum value. And with the increase of the bedded depth, the peak depth of the loess tunnel is indicated, it shows the critical bedded depth of shallow and deep tunnel with the same strength characteristics. At the same time, the variation of surrounding rock pressure with the change of soil strength index is also studied, which is still between the maximum value and the minimum value of common surrounding rock pressure.

Key words: limit equilibrium theory; loess tunnel; failure mode; surrounding rock pressure

长期以来,围岩压力理论是隧道与其它地下工程研究领域中的一项重要研究课题。按荷载结构模型进行洞室衬砌设计时,如何合理地确定围岩压力是该问题的关键所在。现有的围岩压力计算方法主要有全土柱理论、普氏公式、太沙基公式、比尔鲍曼公式、规范法以及计算形变围岩压力的卡柯公式与芬纳公

式^[1-3]。其中,全土柱理论适用于明挖回填工程或埋深较浅、地质条件差的隧道;普氏公式的建立是基于自然平衡拱理论,即假定岩土体开挖后洞顶可以自然成拱,因此仅适用于具有一定自承载能力的深埋隧道;太沙基公式和比尔鲍曼公式主要适用于浅埋隧道。《铁路隧道设计规范》^[4]的围岩压力计算公式是

收稿日期: 2015-12-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41272320);陕西省黄土力学与工程重点实验室重点科研项目资助项目(2010JS084);陕西省科技厅基金资助项目(2014JQ5173);陕西省教育厅基金资助项目(14JK1519)

作者简介: 吴飞洁,女,硕士生,研究方向为黄土动力学与隧道工程。E-mail:1550659940@qq.com

通讯作者: 邵生俊,男,教授,博导,研究方向为黄土力学、黄土动力学等。E-mail:sjshao@xaut.edu.cn

根据不同的隧道埋深而分为超浅埋、浅埋和深埋三种情况,其中超浅埋时采用全土柱理论,浅埋时采用谢家杰^[5]公式,深埋时采用基于样本统计和围岩分级的经验公式。对于工程技术人员,该方法便于实际应用,适用范围相对较广。卡柯公式与芬纳公式是基于对圆形洞室围岩形变压力分析所提出的两种围岩压力计算方法。这两个公式中,塑性区域半径的确定大多凭借经验公式,缺乏一定的理论基础。

综上所述可见,现有的围岩压力计算方法均具有其自身的适用性和局限性^[6],目前尚没有一种完全适用于黄土隧道围岩压力的计算方法。对此,本文通过调查分析黄土隧道围岩的破坏模式和围岩压力的现场实测结果,提出一种基于极限平衡理论的黄土隧道围岩压力计算方法,并通过实例计算,比较不同围岩压力计算方法对黄土隧道的适用性。该研

究对于隧道围岩压力计算的理论研究和黄土隧道工程建设都具有一定的实际意义。

1 黄土隧道围岩的破坏模式和围岩压力监测结果分析

1.1 黄土隧道围岩的破坏模式

在依托郑西客运专线大量实地调查资料^[7-8]的基础上,发现隧道上方的地表裂缝基本对称分布在隧道中线两侧,且地表裂缝离隧道中线的距离随隧道埋深增加而增大,现场调查的典型裂缝情况如图1所示。这一现象与浅埋隧道围岩理论破坏模式的发展趋势一致。与此同时,也对破裂角进行了大量的现场调查,最终确定实际破裂角是从地表开始到隧道边墙即最大宽度处为止,其典型断面实际破裂角如图2所示。

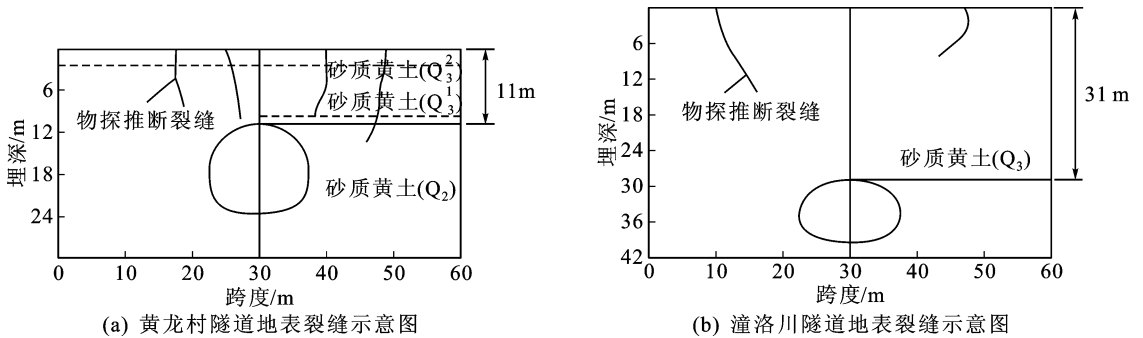


图1 黄土隧道典型裂缝分布图^[9]

Fig. 1 Distribution of typical cracks of loess tunnel

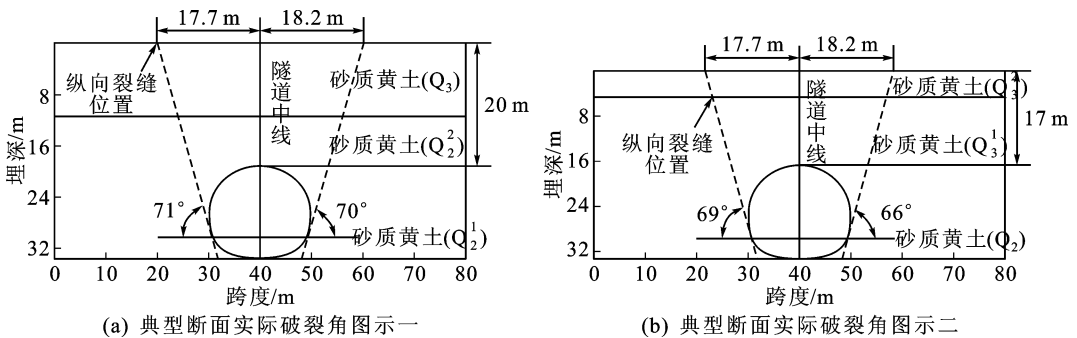


图2 典型断面实际破裂角^[9]

Fig. 2 Angle between typical failure and horizontal planes

1.2 围岩压力监测结果分析

通过分析大量的郑西客运专线初期支护围岩压力的现场实测资料发现,围岩压力基本都表现为压力,即隧道开挖后围岩有向洞内挤压的趋势,这在理论上是符合实际的。

围岩压力沿洞室周边分布并不均匀,其最大值可能出现在洞周的任一部位,这是由洞室周围的地

层条件和围岩强度的不确定性引起的。但总体而言,黄土^[10]隧道围岩压力“猫耳朵”分布性状较为明显,围岩压力最大值出现在拱腰而非拱顶,如图3所示(图中 Y_i 为各监测点的位置,相应围岩接触压力单位均为kPa)。这与前面通过实地调查确定的实际破裂角是相吻合的,即从地表开始到隧道边墙即最大宽度处(拱腰)为止。

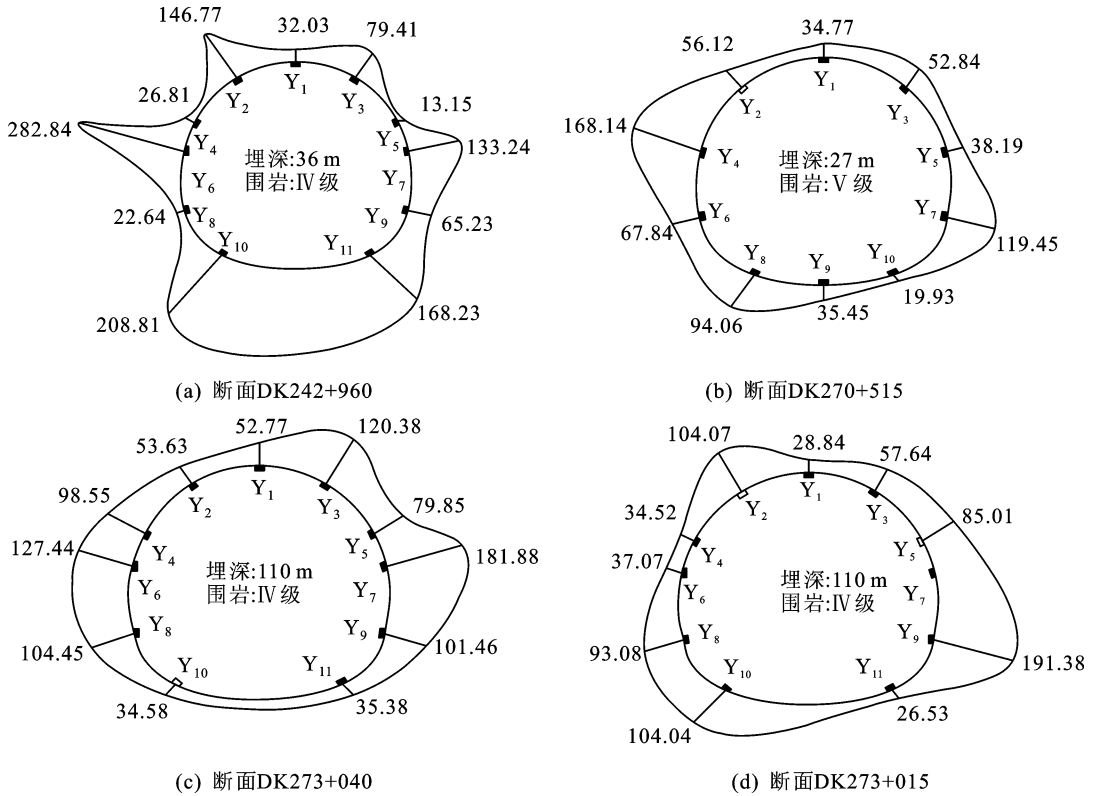


图 3 函谷关隧道围岩压力监测分布图^[9]

Fig. 3 Measured surrounding rock pressure of Hanguguan tunnel

2 基于极限平衡理论的黄土隧道围岩压力计算方法

2.1 基本原理

依据黄土隧道实地调查的破坏模式和围岩压力的现场实测结果,提出了基于极限平衡理论的黄土隧道围岩破坏模型。由于洞室开挖,围岩自身的承载力不足以负荷逐渐增大的围岩压力,引起上覆岩体向下移动,同时带动两侧三棱体下沉,最终形成达到极限平衡条件的破坏区,如图 4 所示。

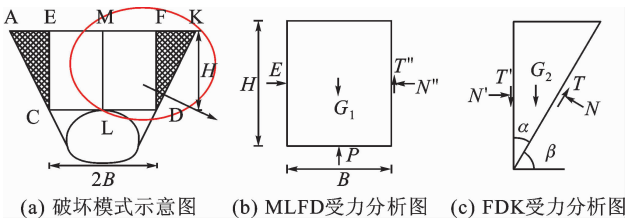


图 4 新模型示意图

Fig. 4 Diagram of the new model

图中假定 ECDF 沿侧墙竖直面 FD、EC 呈刚体运动,当洞室开挖时 ECDF 下沉,并同时带动两侧三棱体 ACE 与 FDK 下沉,最终导致两侧楔形土体发生塑性滑移破坏。此时洞室两侧形成的破裂面与水平面的夹角为 β 。假定拱顶上方刚体和两侧塑性

楔形体服从极限平衡条件,拱顶上方刚体对称,竖直面只有正应力(ML 平面上剪应力等于零),且服从静止土压力变化规律。

2.2 计算公式推导

截取破坏区的一半作为脱离体,其作用力示于图 4 中的(b)、(c)(图中 T' 、 N' 与 T'' 、 N'' 为两个块体之间的作用力与反作用力)。分别建立块体 MLFD 与块体 FDK 的力平衡方程,并联立求解得:

$$N = G \sin \alpha - P \sin \alpha + E \cos \alpha \quad (1)$$

$$T = G \cos \alpha - P \cos \alpha - E \sin \alpha \quad (2)$$

式中, E 为中轴线上的静止土压力; T 、 N 分别为破裂面上的切向力与法向力; G_1 、 G_2 分别为块体 MLFD 与块体 FDK 的重力,且 $G = G_1 + G_2$; P 为围岩压力; β 为破裂面与水平向夹角(即破裂角,通常 $\beta = 45^\circ + \varphi/2$, 其中 φ 为黄土的摩擦角),且定义 $\alpha = 90^\circ - \beta$ 。

在洞室上覆岩体 MLDK 中取一厚度为 dh 的微元条,其沿斜边 DK 方向长度为 dl ,洞室埋深为 h ,微元条的宽度为 b ,由图示几何关系可知 $dl = dh / \cos \alpha$;则作用在微元条两端的静止土压力 dE 、破裂面上的摩擦力 dT 及正压力 dN 分别为:

$$dE = \sigma_x dh \quad (3)$$

$$dT = \tau_i dl \quad (4)$$

$$dN = \sigma dl \quad (5)$$

式中, σ_x 为作用在 MLDK 上的水平向应力; τ_t 、 σ 分别为破裂面上的抗剪强度与正应力。

因此,从地面到洞室顶部岩体中, E 、 T 、 N 分别为:

$$E = \int_0^H \sigma_x dh = \int_0^H K_0 \sigma_z dh = \int_0^H K_0 \gamma z dh = \frac{1}{2} K_0 \gamma H^2 \quad (6)$$

$$N = \frac{1}{\cos\alpha} \int_0^H \sigma dh \quad (7)$$

$$T = \frac{1}{\cos\alpha} \int_0^H \tau_t dh = \frac{1}{\cos\alpha} \int_0^H (\sigma \tan\varphi + c) dh = \tan\varphi N + \frac{cH}{\cos\alpha} \quad (8)$$

式中, K_0 为静止土压力系数; σ_z 为作用在 MLDK 上的竖向应力; z 为沿深度方向的任意埋深; c 为黄土的粘聚力(kPa); γ 为黄土的容重($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$); H 为黄土隧道的埋深(m)。

在洞室顶部土体下沉过程中,作用于洞室上的总重力 G 为块体 MKDL 的自重,即图 4 中块体 MLFD、块体 FDK 的重力之和:

$$G = G_1 + G_2 = \gamma HB + \frac{1}{2} \gamma H^2 \tan\alpha \quad (9)$$

将 E 、 N 、 T 、 G 代入式(1)、(2),求得围岩压力 P :

$$P = G - \frac{\sin\alpha + \cos\alpha \tan\varphi}{\cos\alpha - \sin\alpha \tan\varphi} E - \frac{cH}{\cos\alpha(\cos\alpha - \sin\alpha \tan\varphi)} \quad (10)$$

则单位宽度作用的围岩荷载:

$$p_a = \frac{P}{B} = \gamma H \left[1 + \frac{1}{2} \frac{H}{B} \tan\alpha - \frac{\sin\alpha + \cos\alpha \tan\varphi}{\cos\alpha - \sin\alpha \tan\varphi} \cdot \frac{1}{2} K_0 \frac{H}{B} - \frac{c}{\gamma B} \cdot \frac{1}{\cos\alpha(\cos\alpha - \sin\alpha \tan\varphi)} \right] \quad (11)$$

若令:

$$K = 1 + \frac{1}{2} \frac{H}{B} \tan\alpha - \frac{\sin\alpha + \cos\alpha \tan\varphi}{\cos\alpha - \sin\alpha \tan\varphi} \cdot \frac{1}{2} K_0 \frac{H}{B} - \frac{c}{\gamma B} \cdot \frac{1}{\cos\alpha(\cos\alpha - \sin\alpha \tan\varphi)} \quad (12)$$

$$p_a = K\gamma H \quad (13)$$

式中, B 为黄土隧道围岩破裂面拱顶上方的有效宽度(m)。

水平围岩压力采用朗肯主动土压力理论进行计算。

3 新模型围岩压力合理性验证

参考宝兰客运专线的勘察设计资料,黄土隧道土层的容重取为 18 kN/m^3 ,内摩擦角取为 25° ,粘聚力取为 30 kPa ,隧道跨度取为 14.72 m ,隧道高度取为 12.58 m ,静止土压力系数 K_0 取为 0.58 (按《建

筑基础工程技术规范》中的经验公式计算)。设隧道埋深取值为 $0 \sim 120 \text{ m}$,计算得到的新模型围岩压力与隧道埋深的关系如图 5 所示。由图 5 可以看出,新模型围岩压力计算结果介于比尔鲍曼公式与太沙基公式之间,且随埋深的增加呈抛物线形式变化。围岩压力峰值出现在埋深 $60 \sim 70 \text{ m}$ 之间,超过峰值埋深之后,围岩压力迅速衰减,当隧道埋深超过一定的范围后,围岩压力甚至会出现负值,这与工程实际不符。因此,此方法适用于浅埋隧道围岩压力计算,其围岩压力峰值对应的埋深是深浅埋临界埋深。

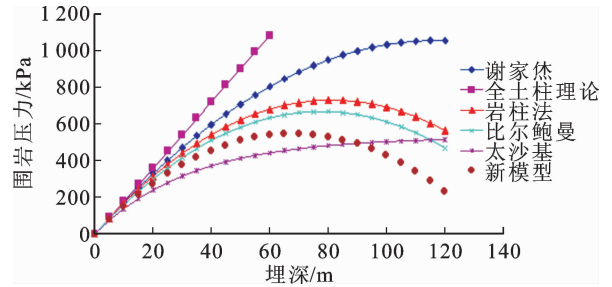


图 5 新模型计算围岩压力与隧道埋深的关系

Fig. 5 Relationship between the surrounding rock pressure via the new model and the bedded depth of tunnel

为了进一步验证新模型理论的合理性,计算不同 c 值、 φ 值下的围岩压力,其变化趋势分别如图 6、图 7 所示。

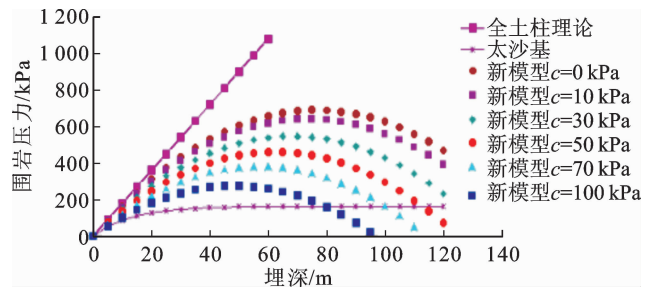


图 6 不同黏聚力条件下的新模型围岩压力

Fig. 6 Surrounding rock pressure of the new model under different conditions of cohesion

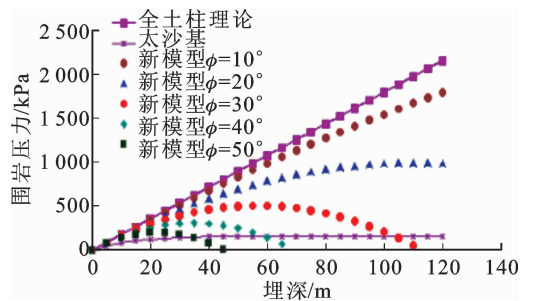


图 7 不同内摩擦角条件下的新模型围岩压力

Fig. 7 Surrounding rock pressure of the new model under different conditions of internal frictional angle

由图 6 可知,当 c 值增大时,围岩压力逐渐减

小,与围岩越稳定围岩压力越小这一客观规律吻合,表明了新模型的合理性。同时,不管 c 值怎么变化,峰值点之前的围岩压力总是介于全土柱理论与太沙基公式之间,即现有围岩压力计算方法结果的最大值与最小值之间,符合黄土隧道围岩压力量值的大小及其变化规律。

图7对比了不同内摩擦角的围岩压力变化趋势,可以看出,随着内摩擦角的增大,围岩压力逐渐减小,这一现象符合围岩压力随内摩擦角变化的客观规律。总体上看,不论 φ 值变化范围多大,峰值点之前的围岩压力总是介于全土柱理论与太沙基公式之间,符合黄土隧道围岩压力量值的大小及其变化规律。因此,新模型对浅埋黄土隧道围岩压力的计算具有明显的合理性。

与此同时,新模型提供了一种新的界定黄土隧道深浅埋的方法。本文认为曲线的拐点,即为界定隧道深浅埋的分界点,与以往深浅埋的分界点相比,该分界点处隧道埋深稍微偏大,故在计算围岩压力时,偏于保守。但考虑到黄土隧道地区普遍存在的不良地质条件及频繁发生的隧道工程问题,建议采用。

图8给出了粘聚力与深浅埋临界深度的关系。针对同一种黄土,不同初始湿度的粘聚力变化较大,故含水率的变化将引起深浅埋临界值的改变。随着含水率的减小,粘聚力逐渐增大,则深浅埋临界深度减小,这与实际工程一致。

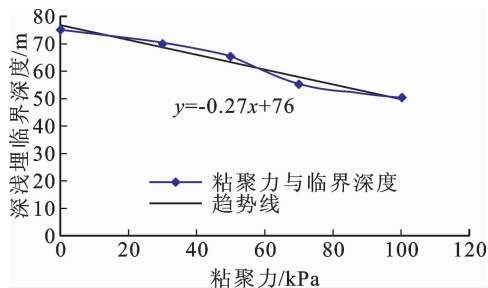


图8 粘聚力与深浅埋临界埋深的关系

Fig. 8 Relationship between the critical bedded depth of shallow and deep tunnel and the cohesion

4 结论

1) 本模型依据黄土隧道实地调查的破坏模式和围岩压力的现场实测结果,在推导公式时,综合考虑了隧道有效宽度、隧道埋深、黄土力学特性参数、破裂角、静止土压力系数以及容重对围岩压力的影响,较为全面地反映了各相关因素对黄土隧道围岩压力的影响。因此,本式可以更好地反映黄土隧道的破坏机理,从而使计算结果更为合理。

2) 新模型围岩压力计算结果介于比尔鲍曼公

式与太沙基公式之间,且随埋深的增加呈抛物线形式变化。当隧道埋深超过某一深度时,围岩压力为负值,这与工程实践相违背。因此,此方法仅适用于浅埋隧道围岩压力计算。

3) 本式计算得出的围岩压力峰值可用于判断深浅埋临界深度,随着黄土粘聚强度的减小,深浅埋临界深度减小。同时,随着黄土内摩擦角的减小,深浅埋临界深度减小。

参考文献:

- [1] 孙钧,侯学渊. 地下结构[M]. 北京:科学出版社,1987.
- [2] 赵明阶. 岩石力学[M]. 北京:人民交通出版社,2011:8.
- [3] 沈明荣,陈建峰. 岩体力学[M]. 上海:同济大学出版社,2006.
- [4] 铁道第二勘察设计院. 铁路隧道设计规范:TB10003—2005[S]. 北京:中国铁道出版社,2005.
- [5] 谢家杰. 浅埋隧道的地层压力[J]. 土木工程学报,1964,(6):58-70.
XIE Jiexiao. Earth pressure on shallow burial tunnel[J]. China Civil Engineering Journal, 1964,(6): 58-70.
- [6] 李鹏飞,周焯,伍冬. 隧道围岩压力计算方法及其适用范围[J]. 中国铁道科学,2013,34(6):55-60.
LI Pengfei, ZHOU Ye, WU Dong. Calculation method for surrounding rock pressure and application scopes[J]. China Railway Science, 2013,34(6): 55-60.
- [7] 王明年,郭军,罗禄森,等. 高速铁路大断面深埋黄土隧道围岩压力计算方法[J]. 中国铁道科学,2009,30(5):53-58.
WANG Mingnian, GUO Jun, LUO Lusen, et al. Calculation method for the surrounding rock pressure of deep buried large sectional loess tunnel of high-speed railway[J]. China Railway Science, 2009,30(5): 53-58.
- [8] 王明年,郭军,罗禄森,等. 高速铁路大断面黄土隧道深浅埋分界深度研究[J]. 岩土力学,2010,31(4):1157-1162.
WANG Mingnian, GUO Jun, LUO Lusen, et al. Study of critical buried depth of large cross-section loess tunnel for high speed railway[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010,31(4):1157-1162.
- [9] 赵勇,李国良,喻渝. 黄土隧道工程[M]. 北京:中国铁道出版社,2011.
- [10] 葛苗苗,李宁,郑建国,等. 基于蠕变试验的黄土高填方工后沉降规律数值研究[J]. 西安理工大学学报,2015,31(3):295-300.
GE Miaomiao, LI Ning, ZHENG Jianguo, et al. Numerical study on the settlement regularity of loess high fill engineering based on creep tests[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2015,31(3):295-300.

(责任编辑 周 蓓)