

考虑围岩强度劣化的隧道仰拱隆起变形分析

高 震¹ 马伟斌² 吴 旭¹ 王素康¹

(1. 北京交通大学城市地下工程教育部重点实验室, 北京 100044; 2. 中国铁道科学研究院集团有限公司, 北京 100081)

摘要 针对高速铁路隧道底部结构隆起变形问题, 基于强度劣化理论, 给出了泥质沉积岩地层条件下围岩强度降低引起的底部结构隆起变形机理模型。将强度劣化理论应用于数值模拟计算, 结果表明隧底部结构隆起变形量随着围岩黏聚力的降低而增大; 模拟值与现场监测数据变形量中线最大值相差约 16.1%, 边线最大值相差约 11.3%; 底部结构隆起变形趋势大致相符。将现场实测值仰拱隆起变形量与模拟值进行比较, 得出围岩黏聚力降低随时间变化呈非线性趋于稳定, 验证了强度劣化模型的适用性; 仰拱填充层塑性区范围随黏聚力降低由排水沟开始逐渐向下、向两边扩展, 黏聚力降低 40% 时塑性区拉破坏区域与现场监测裂缝位置大致相同。研究结果可为以后此类围岩隧道结构断面设计应考虑围岩强度劣化提供参考。

关键词: 隧底结构; 隆起变形; 强度劣化; 数值模拟

中图分类号: U459.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-131X(2020)S1-0342-06

Analysis of invert heaving considering strength degradation of surrounding rock

Gao Zhen¹ Ma Weibin² Wu Xu¹ Wang Sukang¹

(1. Key Laboratory of Urban Underground Engineering of the Ministry of Education, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. China Academy of Railway Sciences Corporation Limited, Beijing 100081, China)

Abstract Aiming at the problem of uplift deformation of the bottom structure of high-speed railway tunnels, based on the theory of strength degradation, this paper gives a model of the uplift deformation mechanism of the bottom structure caused by the decrease of the surrounding rock strength under the condition of muddy sedimentary rock formation. Applying the strength deterioration theory to numerical simulation calculations, the results show that the amount of uplift deformation of the tunnel bottom structure increases with the decrease of the cohesive force of the surrounding rock. The difference between the simulated value and the on-site monitoring data is about 16.1% of the maximum value of the center line, and the difference of the maximum value of the side line is about 11.3%. The deformation tendency of the arch uplift is roughly consistent. Comparing the field measured uplift deformation with the simulated value, it is concluded that the cohesion of surrounding rock decreases with time and becomes non-linear and tends to stabilize, which verifies the applicability of the strength degradation model; As the cohesive force decreases, the plastic zone of the invert arch fill layer gradually starts from the drainage ditch and expands to both sides. When the cohesive force decreases by 40%, the tensile zone of the plastic zone is roughly the same as the crack location on the site monitoring. The results provide a reference for the strength degradation of surrounding rock that should be considered in the future section design of such tunnel structures.

Keywords: tunnel bottom structure; uplift deformation; strength deterioration; numerical simulation

E-mail: 17115299@bjtu.edu.cn

引 言

我国新建时速 250~350km 的高速铁路主要采用无砟轨道结构^[1], 由于高速铁路对于轨道的变形控制、平顺性、使用年限等要求都要比普通铁路轨道更高^[2], 因此无砟轨道对隧道底部结构的变形要求

基金项目: 中国铁路总公司重大课题 2016G002-铁路隧道底部新型结构设计施工关键技术研究

作者简介: 高震, 博士研究生

导师简介: 吴旭, 博士, 教授

收稿日期: 2020-06-15

也更高^[3]。我国地形地势错综复杂,在沉积岩等较差地层修建铁路隧道时,隧底结构的长期变形控制难度大,部分隧道在施工过程中、施工完成后以及运营较短时间内便产生隧底结构的隆起变形现象,为治理此种病害已造成巨大经济损失。国内外学者对底鼓问题进行了大量研究:孔恒等^[4]以工程实践为基础,对隧道底部变形的产生原因、变形分类与变形控制措施进行了探究; Seki Shige-kazu^[5]采用模型试验探究不同加载方式下底部结构破坏模型。Butscher. C^[6]等对软岩膨胀性围岩从微观分子运动角度到宏观围岩变形角度进行分析,得出底鼓变形的机理形式。由于隧道底鼓变形机理的复杂性,需要结合不同的围岩地质条件进行更深入的研究。本文针对含少量膨胀黏土泥质沉积岩地层的隧道底鼓案例,分析含水率变化等因素导致隧底围岩强度降低的底鼓变形机理,通过数值模拟结合现场监测数据,研究隧底结构隆起变形受力的发展过程,为今后类似地质条件的隧道工程设计提供参考。

1 隧道底鼓机理

1.1 底鼓影响因素

隧道底部结构的隆起变形在时间上可分为隧道施工过程中^[7-8]和隧道施工完成运营过程中^[9-10]产生。底部结构产生隆起变形的影响因素众多^[11-12],主要分为四类:①施工引起地下水流向变化同时结构防水性能差引起底部产生较高的水头压力;②隧道所处地层含较多的膨胀性黏土矿物,遇水产生物理化学反应,产生较大的膨胀应力和膨胀变形;③周围地层的强度应力比大,隧道围岩较易产生软岩塑性大变形;④隧道结构周围环境变化,如车辆振动、地震加速度等。

现在的隧道工程主要是在地球表层进行施工,而沉积岩是地球表面分部最广的岩石,约有 70% 为沉积岩。对既有铁路隧道产生隧底结构隆起变形进行调查,结果显示泥质砂岩、泥岩以及含少量膨胀性黏土矿物的地层,隧道结构容易产生仰拱结构的隆起变形。根据调查文献的整理^[13-15],由图 1 可知,不同地质年代泥质岩石对水的“敏感度”的不同,有些泥质岩含水率增加较小即产生较大的强度降低,但泥质岩从整体上看,随含水的增加泥岩单轴抗压强度降低呈非线性趋于稳定。

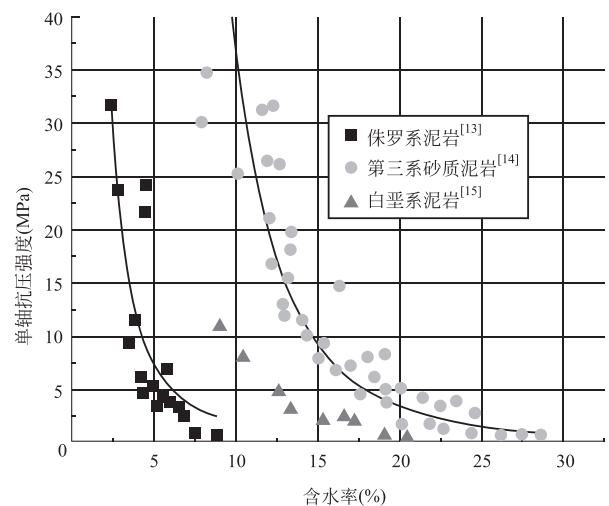


图 1 单轴抗压强度随含水率的变化

Fig. 1 Variation of uniaxial compressive strength with moisture content

1.2 底鼓变形机理

工程中隧底结构的隆起变形原因错综复杂^[16],前人对变形机理的研究可分为:①软弱围岩在高地应力条件下产生“挤压型”变形,即塑性剪切膨胀引起的底部结构挤压变形(squeezing):软岩隧道当围岩强度应力比小于 1 时,由于隧道开挖施工等原因引起地下水分布变化,底部围岩的含水率增加;泥岩沉积岩产生随含水率的增加强度劣化,围岩塑性变形增大产生剪胀松弛,抗剪强度降低,导致底部结构隆起变形破坏。②隧道底部围岩含有一定量膨胀性黏土矿物,在物理化学综合作用下产生体积膨胀、应力变化,进而引起隧底结构膨胀变形(swelling):膨胀性黏土矿物如蒙脱石、伊利石、高岭石等遇水会发生化学膨胀,底部结构承载能力低于膨胀应力时,结构产生隆起、开裂等破坏。

实际的隧道底部结构隆起变形是两种变形机理的复合作用,一般可以用强度劣化模型进行解释(如图 2 所示)。隧道围岩在地下水等作用条件下既产生膨胀性黏土矿物的膨胀变形,又引起围岩软化、强度降低,二者共同作用进一步促进塑性减胀,使得隧底结构产生隆起变形。强度劣化不只是围岩吸水产生,围岩受开挖扰动应力重分布,周围也会存在一个力学性能参数变差的区域,该区内围岩力学参数(黏聚力 C 、内摩擦角 ϕ)。

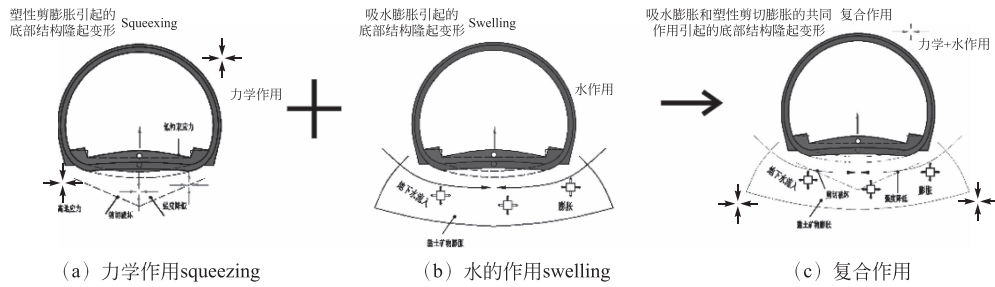


图 2 隧道仰拱隆起变形机理
Fig. 2 Mechanism of heave of tunnel inverted arch

2 强度劣化理论

有限元强度折减法于 20 世纪 70 年代应用于边坡稳定分析, 该方法既可以计算边坡破坏滑动面, 又可以计算边坡的强度储备安全系数; 之后逐步被引入隧道的稳定性研究中^[17,18]。隧道开挖后, 围岩由开挖前的三向应力状态逐渐向二向应力状态调整, 由于产生应力集中和卸荷作用使得隧道围岩力学环境改变, 在周围岩体形成一个力学性能较差的破损区, 位于该区内的围岩力学参数(黏聚力 C 、内摩擦角 ϕ 等)较开挖前产生不同程度的劣化^[19]。

材料任意平面上一点剪应力等于其抗剪强度时该点处于破坏的临界状态, 此时对应的函数可由下式表示:

$$\tau = f(\sigma) = c + \sigma \tan \phi \quad (1)$$

式中: τ 为剪切破坏面剪应力; σ 为法向应力; c 为黏聚力; ϕ 为内摩擦角。由图 3 可知, 当 (c, ϕ) 由峰值强度 (c_p, ϕ_p) 降低到残余强度 (c_r, ϕ_r) 时, 材料由峰值剪切强度降低到残余剪切强度。

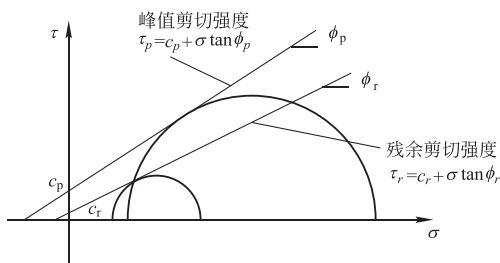


图 3 峰值和残余剪切强度
Fig. 3 Peak and residual shear strength

依据莫尔—库伦强度理论, 可由围岩黏聚力 c 和内摩擦角 ϕ 来表达剪切强度。参数变化可分为: (I) 两参数以突变方式降低, (II) 两参数以渐变方式降低, 如图 4 所示:

当 $0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon'_p$ 时, 围岩黏聚力 c 和内摩擦角 ϕ 保

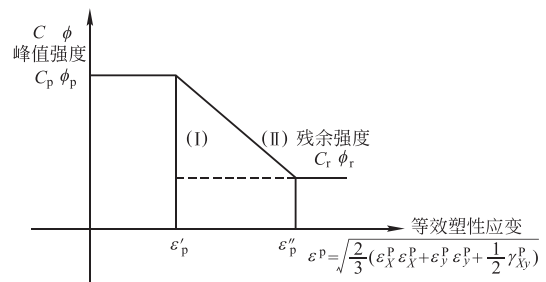


图 4 黏聚力、内摩擦角变化图

Fig. 4 Variation diagram of cohesion and internal friction angle

持不变, 为峰值强度。

$$\begin{cases} c = c_p \\ \phi = \phi_p \end{cases} \quad (2)$$

当 $\varepsilon'_p \leq \varepsilon \leq \varepsilon''_p$ 时, 围岩黏聚力 c 和内摩擦角 ϕ 由于塑性等效应变的增加, 呈线性降低至残余强度。

$$\begin{cases} c = f(\varepsilon_p) \\ \phi = g(\varepsilon_p) \end{cases} \quad (3)$$

当 $\varepsilon \leq \varepsilon''_p$ 时, 围岩处于残余强度状态, 两参数不再发生变化, 保持为一个由围岩自身性质决定的固定值。

$$\begin{cases} c = c_r \\ \phi = \phi_r \end{cases} \quad (4)$$

3 隧底结构变形特性分析

数值计算模型高 100m, 宽 100m。采用全断面开发进行模拟, 重点关注围岩产生强度劣化的区域, 该区域设定在仰拱下方 5m 的梯形范围内(根据数值模拟结合地下水重力作用下可能影响的区域, 将基底围岩距离仰拱底面深度 5m 范围作为劣化区)。设置初始应力场为 5.5MPa 的静水压力场, 模拟采用应力释放全断面开挖, 研究底部围岩强度劣化对隧底结构的影响。通过在隧道开挖时控制应力释放系数

(初支释放 60%) 来模拟施工中开挖隧道的空间效应, 数值模型示意图如图 5。

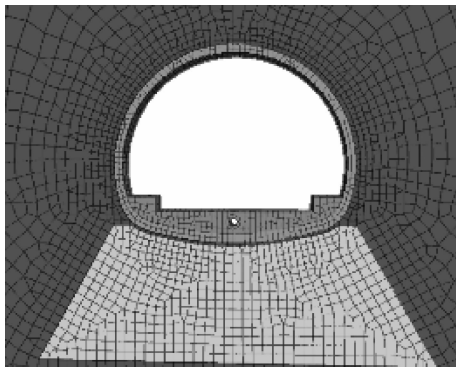


图 5 数值模型示意图

Fig. 5 Schematic diagram of numerical model

模拟参数中围岩弹性模量以 GSI 围岩分级系统为基础进行取值, IV 级围岩内摩擦角 $\phi = 27^\circ \sim 39^\circ$, 取 $\phi = 28^\circ$; 结合现场选用合适的初支、二衬混凝土的参数, 根据《铁路隧道设计规范》参考规范、文献^[20-22]综合分析选取模拟参数如表 1 所示。

表 1 模拟材料参数

Table 1 Simulated material parameters

名称	E (MPa)	ν	γ (kN/m ³)	c (MPa)	ϕ (°)
围岩	300	0.31	21	1.00	28
支护	23500	0.25	25	3.52	30
衬砌	25500	0.25	25	4.43	30
仰拱	25500	0.25	25	4.43	36
填充	21500	0.25	25	2.61	36

数值分析通过调节底部围岩黏聚力值(图中黄色区域), 实现底部围岩强度劣化过程模拟。分析采用黏聚力由峰值强度突变至残余强度(黏聚力依次分别降低 10%, 共降 4 次), 研究随着底部围岩黏聚力的降低, 仰拱隆起变形量与变形规律; 利用实测变形量与模拟变形量相同时反推围岩黏聚力与时间对应性, 研究黏聚力降低与时间的关系。

3.1 结构隆起变形量

围岩黏聚力降低情况下隧道底部结构隆起变形增量如图 6 所示。

模拟中依次降低 10% 的黏聚力, 仰拱结构随之产生向上的隆起变形, 结构中部隆起变形量最大。围岩强度劣化过程中, 仰拱和填充层可看作弹性地基梁结构, 底部围岩对仰拱结构有沿半径方向的压

应力。隧道开挖导致附近围岩地应力重分布, 由于地下水等作用底部结构围岩强度劣化、变形增大, 隧底结构阻止围岩变形所产生的约束反力也随之增大, 进而引起隧底结构的隆起变形增加; 根据弹性地基梁理论, 结构中部所受弯矩最大, 所以中部隆起变形也最大。

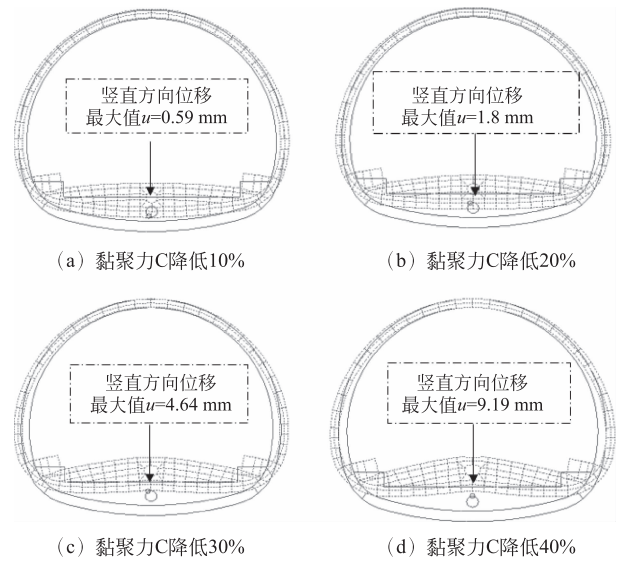


图 6 底部结构隆起位移变形增量图

Figure. 6 Deformation of structure heave displacement at the bottom

对仰拱表面填充层变形量随黏聚力变化进行分析。数值模拟中黏聚力由 10% 依次突变至 20%、30%、40%, 在填充层表面取点 A-G。将模拟取值点隆起变形与现场监测值进行比较, 如图 7 所示。

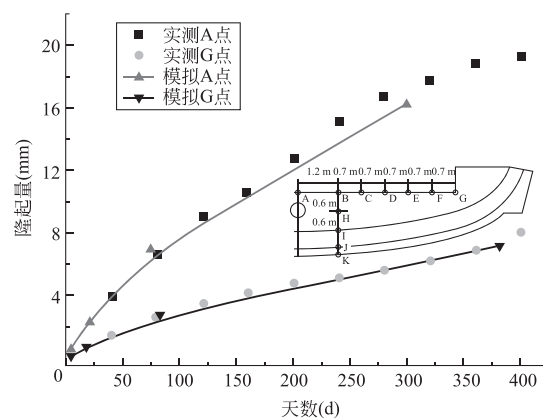


图 7 仰拱隆起位移

Fig. 7 Heave displacement of inverted arch

对福川隧道 DK41+285-DK41+380 段进行为期 397 天现场监测, 将模拟值与监测数据进行对比分析, 由图 7 可得: ①随着时间的增加, 仰拱变形量增大, 整体变形值趋于收敛。数值计算中, 随着围岩

黏聚力降低, 仰拱隆起变形量增大, 与现场监测数据变形趋势基本一致。②监测里程断面范围内仰拱标高上拱量均小于 20mm, 在 DK41+285 断面现场监测累计仰拱隆起位移量最大为 19.32mm。模拟计算中仰拱结构统计点 A 累计竖向位移量为 16.21mm, 与现场监测累计变形量数据最大值偏差为 16.1%; 二者偏差值说明模拟计算大致与现场相符。实测仰拱填充层 G 点与数值计算最大值相差为 11.3%, 变形趋势与也大致吻合。③实测仰拱位移量与模拟值变化趋势同为中线处隆起量最大, 由中到边隆起位移量相对减小。

利用实测隆起量与模拟变形量对比, 反分析得出黏聚力降低与时间的关系如图 8 所示。

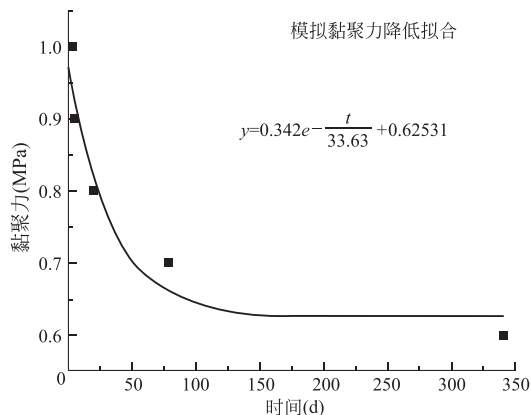


图 8 黏聚力随时间变化图

Fig. 8 Cohesive variation over time

图 8 将实测变形量与模拟值相同时, 进行位移反分析, 可以得出: ①围岩黏聚力降低随时间的变化呈现负指数非线性变化, 这与试验与文献中泥质沉积岩随含水率增加, 其单轴抗压强度与黏聚力二者都呈现非线性降低相符。②黏聚力降低速率在开始较短时间内很快, 由 10%降低至 20%大约需要 15 天左右, 而有 20%降低至 30%大约需 60 天, 之后呈现黏聚力降低速率减慢逐渐趋于稳定, 黏聚力降低与时间呈非线性趋于稳定。

通过现场监查数据整理, 发现隧道不同位置断面仰拱隆起变形量不同, 究其原因可能是隧道不同位置所处范围内地质、地应力不同, 导致隧底围岩产生的强度劣化程度有差异, 本质为隧底围岩出现了不同程度的黏聚力降低。

3.2 结构裂缝

对于隧道底部结构仰拱填充层裂缝的研究, 应用底部结构塑性区变化进行分析; 隧道断面呈对称结构, 取右半部进行底部围岩黏聚力降低塑性区分部变化的

分析。模拟中采用摩尔库伦本构对仰拱填充层进行分析, tension-n 和 tension-p 可理解为材料进入拉破坏。利用塑性区变化来研究仰拱破坏的趋势。模拟工况依次降低 10%, 当黏聚力降低 40%时, 将现场钻探结构与数值模拟结果进行对比, 如图 9 所示。

由数值计算结果可得, 当隧底围岩黏聚力值降低 40%时, 计算模型中位于仰拱填充层处演化出较多数目的塑性状态网格, 说明这些位置处材料已进入拉破坏状态。结合填充层所使用的材料为混凝土, 当材料产生拉伸塑性, 其塑性材料的性质导致容易产生拉破坏; 根据图 9 将进入拉伸塑性状态的网格与未进入此状态网格交界面在图中连接分割线可得出, 当隧道底部劣化区围岩黏聚力降低值 40%时, 现场调研隧道断面离缝位置与图中模拟结果中塑性区域与非塑性区域交界线大致相同。

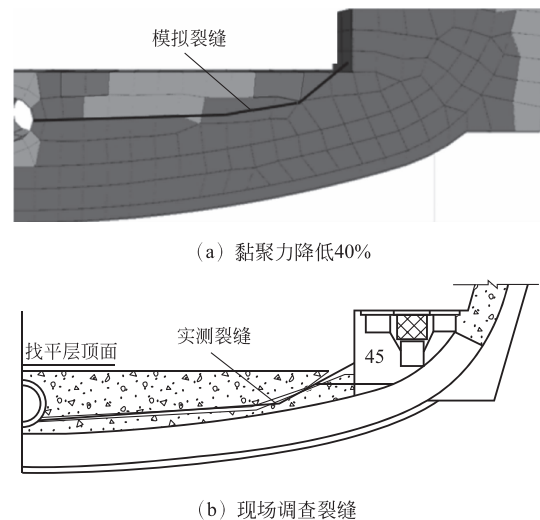


图 9 实测与模拟裂缝

Fig. 9 Measured and simulated cracks

4 结 论

通过对高铁隧道隧底结构隆起变形特征进行分析, 基于强度劣化理论, 采用数值模拟和现场监测结果对比, 所得结论如下:

(1) 仰拱结构竖向累计变形隆起量随隧道底部围岩黏聚力的减小呈非线性增加, 变形量增大速率趋于稳定; 位于底部结构仰拱中线处隆起量最大, 数值计算结果与现场监测值隆起量的最大值相差约 16%。

(2) 围岩黏聚力降低随时间变化呈非线性趋于稳定, 这与围岩随着含水率增加岩体强度逐渐降低相一致。

(3) 随着围岩黏聚力的降低, 仰拱表面填充层塑

性区由上向下、向两边扩展；黏聚力降低至 40% 时，数值模拟仰拱开裂位置与现场监测断面开裂变形大致相同，由于支护和衬砌对于仰拱填充层的表面水平约束作用，使得开裂位置在水沟侧壁附近，水沟侧壁位置的拉破坏塑性区大致呈 45° 向仰拱填充层内部延伸；如裂缝延伸到一定深度，则会呈水平方向一直发展到中心排水沟附近。

参 考 文 献

- [1] 王梦恕. 中国隧道及地下工程修建技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2010 (Wang Mengshu. Tunnelling and underground engineering technology in China[M]. Beijing: China Communications Press, 2010 (in Chinese))
- [2] 朱高明. 国内外无砟轨道的研究与应用综述[J]. 铁道工程学报, 2008(7): 28-30 (Zhu Gaoming. Overall comments on study and application of ballastless track at home and abroad [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2008(7): 28-30 (in Chinese))
- [3] 安国栋. 高速铁路无砟轨道技术标准与质量控制[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2009
- [4] 孔恒, 王梦恕, 张德华. 隧道底板隆起的成因、分类与控制[J]. 中国安全科学学报, 2003, 13(1): 30-33 (Kong Heng, Wang Mengshu, Zhang Dehua. Causation and classification of tunnel floor heave and its control [J]. China Safety Science Journal, 2003, 13(1): 30-33 (in Chinese))
- [5] Seki S, Kaise S, Morisaki Y, et al. Model experiments for examining heaving phenomenon in tunnels [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2008, 23(2): 128-138
- [6] Butscher C, Mutschler T, Blum P. Swelling of clay-sulfate rocks: a review of processes and controls [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2016, 49(4): 1533-1549
- [7] 孙韶峰, 袁竹, 赵万强. 高地应力区砂泥岩地层隧道开裂原因分析及处理原则[J]. 现代隧道技术, 2013, 50(4): 170-175 (Sun Shaofeng, Yuan Zhu, Zhao Wanqiang. Cause analysis and treatment principles for tunnel lining cracking in sandy mudstone with high geostress [J]. Modern Tunnelling Technology, 2013, 50(4): 170-175 (in Chinese))
- [8] 肖广智. 不良、特殊地质条件隧道施工技术及实例(二)[M]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2015
- [9] 陈贵红, 巩安. 紫坪铺隧道隧底隆起处治探讨[J]. 公路, 2014(1): 228-232 (Chen Guihong, Gong An. Discussion on treatment of Zipingpu tunnel uplift [J]. Highway, 2014(1): 228-232 (in Chinese))
- [10] 奥井裕三, 鹤原敬久, 太田裕之, など. 盃山トンネルに発生した急激な路面隆起変状の計測および解析によるメカニズムの考察[J]. トンネル工学報告集, 2009, 19: 173-180
- [11] 孟令宝. 南吕梁山隧道底鼓机理及整治措施研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2017 (Meng Lingbao. Study on the tunnel floor heave mechanism and remediation measures of South Lvliangshan tunnel [D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2017 (in Chinese))
- [12] Mothersille D, Littlejohn S. Grouting of anchors to resist hydrostatic uplift at burnley tunnel [C]//Proceedings of the Fourth International Conference on Grouting and Deep Mixing. Reston: American Society of Civil Engineers, 2012
- [13] 刘清扬, 李林, 马显春. 四川盆地红层路堑岩质边坡天然单轴抗压强度和软化性的对比分析[J]. 道路工程, 2015(3): 62-67
- [14] 张建华, 姚志华. 宁夏宁东地区砂质泥岩的单轴抗压强度特征[J]. 工程勘察 2018(增 1): 107-112 (Zhang Jianhua, Yao Zhihua. Uniaxial compressive strength characteristics of sandy mudstone in Ningdong area, the Ningxia Hui Autonomous Region [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2018(S1): 107-112 (in Chinese))
- [15] 范秋雁. 膨胀岩与工程[M]. 北京: 科学出版社, 2008
- [16] 嶋本敬介, 野城一栄, 小島芳之, など. 地山の塑性化に伴う山岳トンネルの路盤隆起現象とその対策工に関する研究[J]. 土木学会論文集, 2013, 69(1): 54-72
- [17] 张黎明, 郑颖人, 王在泉, 等. 有限元强度折减法在公路隧道中的应用探讨[J]. 岩土力学, 2007, 28(1): 97-101, 106 (Zhang Liming, Zheng Yingren, Wang Zaiquan, et al. Application of strength reduction finite element method to road tunnels [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(1): 97-101, 106 (in Chinese))
- [18] 张永兴, 胡居义, 何青云, 等. 基于强度折减法小净距隧道合理净距的研究[J]. 水文地质工程地质, 2006, 33(3): 64-67 (Zhang Yongxing, Hu Juyi, He Qingyun, et al. On rational clear spacing of tunnel with small clear spacing based on strength reduction technique [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2006, 33(3): 64-67 (in Chinese))
- [19] 周火明, 盛谦, 李维树, 等. 三峡船闸边坡卸荷扰动区范围及岩体力学性质弱化程度研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(7): 1078-1081 (Zhou Huoming, Shengqian, Li Weishu, et al. Excavation-disturbed zone and weaken degree of mechanical properties for rockmass of TGP shiplock slope [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(7): 1078-1081 (in Chinese))
- [20] TB10003—2016 铁路隧道设计规范[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2017 (TB10003—2016 Code for design of railway tunnel [S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2017 (in Chinese))
- [21] Vermeer P A, Borst R D. Non-associated plasticity for soils, concrete and rock [J]. Heron, 1984, 29(3): 1-64
- [22] Grant K. Introduction to rock mechanics [J]. Engineering Geology, 1982, 19(1): 72-74

高 震(1991—), 男, 博士研究生。主要从事隧道与地下工程研究。

马伟斌(1977—), 男, 博士, 研究员。主要从事高速铁路隧道气动效应研究。

吴 旭(1962—), 男, 博士, 教授。主要从事隧道与地下工程研究。

王素康(1993—), 男, 硕士, 助理工程师。主要从事地铁隧道与地下工程研究。