

浅埋洞口段黄土公路隧道施工变形性状现场测试研究

邱明明, 杨果林, 张沛然, 段君义

Field test on the construction deformation characteristics for a loess highway tunnel at the shallow portal section

QIU Mingming, YANG Guolin, ZHANG Peiran, and DUAN Junyi

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202008002>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

渗流作用下黄土含水率变化特征及对隧道工程的影响

Characteristics of moisture content variation of loess under seepage and its influence on tunnel engineering

张晓宇, 毕焕军, 曹峰, 夏万云 水文地质工程地质. 2021, 48(4): 41-47

某铁路隧道底鼓段粉质泥岩微宏观物理力学特性研究

A study of the micro-macro-physical and mechanical properties of silty mudstone in the bottom drum section of a railway tunnel

刘超, 袁伟, 路军富, 张钊 水文地质工程地质. 2020, 47(5): 108-115

广昆铁路复线秀宁隧道大皮坡一中村段岩溶塌陷成因

An analysis of the cause of karst collapses near the Dapipo-Zhongcun section of the Xiuning tunnel of the Guangzhou-Kunming railway

周长松, 邹胜章, 朱丹尼, 谢浩, 申豪勇, 王佳 水文地质工程地质. 2019, 46(3): 146-146

隧道施工期岩爆危险性评价的属性识别模型及工程应用

Attribute recognition model of fatalness assessment of rockburst in tunnel construction and its application

何怡帆, 李天斌, 曹海洋 水文地质工程地质. 2020, 47(2): 102-111

郑万高铁宜万段边坡危岩崩落破坏特征

Caving failure characteristic of slope rockfall on Yiwan section of the Zhengzhou-Wanzhou high-speed railway

黄海宁, 巨能攀, 黄健, 张成强 水文地质工程地质. 2020, 47(3): 164-172

盾构地铁隧道穿越既有铁路桥的沉降分析

An analysis of the settlement of a shield tunnel passing under the operating railway bridge

于德海, 舒娇娇, 秦凯凯 水文地质工程地质. 2020, 47(2): 148-152



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202008002

浅埋洞口段黄土公路隧道施工变形性状现场测试研究

邱明明¹, 杨果林², 张沛然², 段君义²

(1. 延安大学建筑工程学院, 陕西 延安 716000; 2. 中南大学土木工程学院, 湖南 长沙 410075)

摘要: 以某黄土公路隧道工程为依托, 借助现场测试方法研究浅埋洞口段黄土公路隧道地表沉降、拱顶下沉和周边收敛时态分布规律, 并结合实测数据建立隧道施工变形统计分析预测模型。研究表明: (1) 黄土隧道施工变形呈现显著的时间和空间效应, 其时态分布曲线符合指数函数型发展规律; (2) 地表沉降随时间呈增长趋势, 约 60 d 后逐渐趋于稳定, 其最大值($w_{\max}$)的统计变化范围为 $(-30.78 \sim -105.20)$ mm; (3) 横向地表沉降曲线分布呈凹槽形, 沉降槽宽度约 $(3 \sim 5)$ 倍隧道跨度(B), 且隧道开挖引起的地层损失率为 $0.74\% \sim 3.08\%$; (4) 拱顶下沉与周边收敛时态曲线可分为线性增长、持续变形和平稳发展 3 个阶段, 且线性增长阶段占总变形量的 60% 以上; (5) $v_{\max}$ 的统计值变化范围为 $(-17.1 \sim -201.1)$ mm, 其 95% 置信区间为 $[-51.53, -65.11]$, $u_{\max}$ 的统计值变化范围为 $(-12.1 \sim -122.0)$ mm, 其 95% 置信区间为 $[-35.08, -43.39]$, 建议 V 级围岩黄土隧道预留变形量取值范围为 $(-100 \sim -150)$ mm; (6) 拱顶下沉与周边收敛速率时态曲线呈先急剧增加后逐渐衰减趋势, 最终稳定后的拱顶下沉速率(Δv)和周边收敛速率(Δu)依次为 $(-0.05 \sim -0.80)$ mm/d 和 $(-0.02 \sim -0.60)$ mm/d。

关键词: 隧道工程; 黄土隧道; 浅埋洞口段; 现场测试; 变形性状

中图分类号: U456.3⁺1

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2021)03-0135-09

Field test on the construction deformation characteristics for a loess highway tunnel at the shallow portal section

QIU Mingming¹, YANG Guolin², ZHANG Peiran², DUAN Junyi²

(1. School of Architectural Engineering, Yan'an University, Yan'an, Shaanxi 716000, China; 2. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410075, China)

Abstract: Based on a loess highway tunnel project, the temporal distribution rules of ground settlement, vault settlement and peripheral convergence for the loess highway tunnel at shallow portal section are studied with the field test method, and the statistical analysis predictive model for the loess tunnel construction deformation is established combining with the actual measurement data. The results show that (1) the construction deformation of the loess tunnel presents significant time and spatial effects, and the temporal distribution curve can be expressed by an exponential function. (2) The ground settlement shows the growth movement with time, approaching stability after about 60 days, and the maximum ground settlement, $w_{\max}$, ranges from -30.78 to -105.20 mm. (3) The transverse ground settlement curve is of the trough shape, the width of trough is around 3–5 times that of B , and the ground loss rate caused by tunnel excavation ranges from 0.74% to 3.08% . (4) The vault settlement and peripheral convergence experiences successively three stages: linear growth stage, continuous deformation stage and steady development stage, and the deformation of linear growth stage accounts for more than 60% of total deformation. (5) The maximum vault settlement, $v_{\max}$, ranges from -17.1 to -201.1 mm, and its variance estimation for sampling is $[-51.53, -65.11]$ based on the 95% confidence interval. The maximum peripheral

收稿日期: 2020-08-01; 修订日期: 2020-09-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(51778641); 陕西省自然科学基金研究计划项目(2019JQ-834); 陕西省教育厅科研计划项目(19JK0963); 延安市重点研发计划项目(2019ZCSY-006); 延安大学科研计划项目(YDBK2017-32; YDZ2019-08; YDY2020-36)

第一作者: 邱明明(1985-), 男, 博士, 讲师, 主要从事交通岩土工程、隧道及地下工程研究。E-mail: sxdqiuming@163.com

convergence, $u_{\max}$ ranges from -12.1 to -122.0 mm, and its variance estimation for sampling is $[-35.08, -43.39]$ based on the 95% confidence interval. It is suggested that the reasonable reserved deformation values of grade V surrounding rock loess tunnel range from -100 to -150 mm. (6) The rate curves of vault settlement and peripheral convergence increase first, and then decreases sharply with time. The steady displacement rate of vault settlement (Δv) and peripheral convergence (Δu) ranges from 0.05 to 0.80 mm/d and from 0.02 to 0.60 mm/d, respectively.

Keywords: tunnel engineering; loess tunnel; shallow portal section; field test; deformation characteristic

随着我国西部交通工程和“一路一带”建设的深入发展,穿越山岭地段的黄土隧道大量涌现,而浅埋洞口段是隧道施工的高风险地段^[1-4],往往是隧道工程设计与施工中重点关注的问题。同时,由于黄土性质的特殊性^[5],隧道开挖卸荷作用极易诱发软弱黄土围岩产生大变形或位移,引起衬砌侵限、结构开裂、边坡失稳等工程灾害,故明确围岩位移发展变化规律对控制黄土隧道变形和结构稳定具有重要指导意义。

针对这一问题已有众多相关现场测试、理论分析和数值模拟研究成果。如陈建勋等^[6-7]基于现场实测数据,对黄土公路隧道施工变形规律进行了研究。扈世民等^[8]采用现场测试和数值模拟方法对大断面黄土铁路隧道施工变形规律进行了对比分析。李志清等^[9]结合现场测试和理论分析法对浅埋黄土隧道围岩变形特性进行了研究。孟德鑫等^[10]分析了大断面黄土铁路隧道拱顶下沉与周边收敛变化特征,并给出了相应的变形控制措施。赖金星等^[11]对软弱黄土隧道施工变形规律进行了现场测试研究,并给出了相应的变形控制指标。孔庆祥等^[12-13]基于大量的现场实测数据,研究了不同条件下黄土铁路隧道施工变形规律,并对拱顶下沉与周边收敛位移量进行了统计分析。周鹏等^[14]基于实测数据分析了黄土斜坡下偏压隧道围岩变形横向和纵向分布规律。刘小伟等^[15]利用现场实测和数值模拟方法揭示了 Q_2 饱和黄土隧道围岩收敛变形与应力变化特征。李明等^[16]采用数值

模拟方法对不同开挖方法条件下富水大断面黄土隧道流固耦合变形特性进行了对比分析。王道远等^[17]基于模型试验研究了硬塑-流塑浅埋黄土隧道变形特性,并给出了双线黄土隧道合理预留变形量建议值。

由于地质条件差异性、复杂性以及施工的不确定性等因素影响,使得浅埋洞口段隧道施工变形规律存在显著差异,尤其是在黄土隧道研究方面还远落后于工程实践。鉴于此,本文以某黄土公路隧道工程为依托,结合浅埋洞口段现场测试数据,研究浅埋洞口段黄土公路隧道施工引起的地表沉降、拱顶下沉和周边收敛时态分布规律,并进行统计预测分析,研究成果可为黄土地区隧道设计与施工提供参考。

1 依托工程背景

1.1 工程及地质概况

某双向四车道分离式黄土公路隧道,隧道左线起止桩号 ZK86+481 ~ ZK87+642,全长 1 161 m,右线起止桩号 YK86+575 ~ YK87+618,全长 1 043 m。隧道断面开挖跨度 $B=12.82$ m,高度 $H=10.32$ m,为典型的大断面湿陷性黄土 V 级围岩隧道。隧址区属黄土丘陵-黄土梁地貌,冲沟发育,沟谷深切,山间植被茂密,根系发育。隧道埋深(h) $6.0 \sim 78.0$ m,上部覆盖 $20.0 \sim 25.0$ m 的上更新统 Q_3^{al+pl} 新黄土,为 IV 级自重湿陷性黄土,局部夹有黄土状粉质黏土,其下部为中更新统 Q_2^{al+pl} 粉土,中密-密实状,土质较均匀(图 1)。

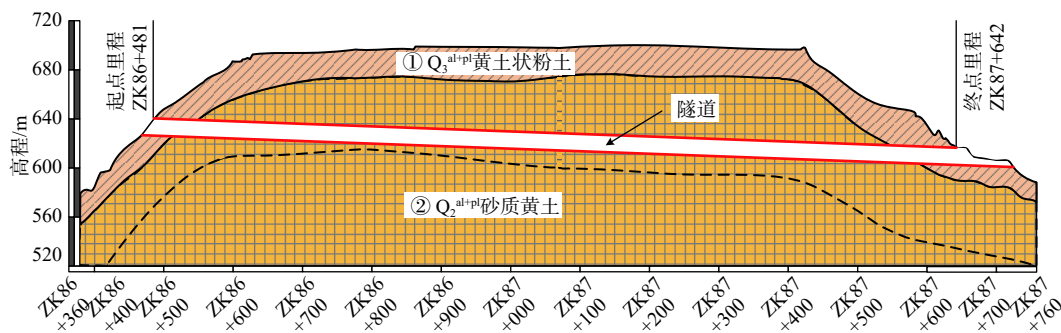


图 1 黄土隧道进出口段地质纵剖面

Fig. 1 Longitudinal geological section of the entrance and exit zone of the loess tunnel

隧道进出口均在黄土梁冲沟段, 两侧为高陡边坡。其中, 左线隧道进口埋深 6.0 m, 出口埋深 6.0 m; 右线隧道进口埋深 1.5 m, 出口埋深 5.0 m。隧道进出口段山体表层为薄层粉土, 结构松散, 为湿陷性黄土状粉土, 天然密度 $1.40 \sim 1.90 \text{ g/cm}^3$, 含水率 $8.6\% \sim 20.2\%$, 黏聚力 $10.0 \sim 27.0 \text{ kPa}$, 内摩擦角 $20.0^\circ \sim 32.0^\circ$, 湿陷系数 $0.016 \sim 0.083$; 洞身段 V 级围岩主要为砂质黄土, 天然密度 $1.65 \sim 2.10 \text{ g/cm}^3$, 含水率 $10.7\% \sim 22.7\%$, 黏聚力 $16.0 \sim 57.0 \text{ kPa}$, 内摩擦角 $18.0^\circ \sim 33.0^\circ$ 。隧址区地下水主要为松散岩类孔隙水, 埋藏深度约 40.0 m 以上, 主要通过大气降水和地表水入渗补给。

1.2 洞口段开挖方法

该黄土隧道支护系统采用复合式衬砌结构, 隧道开挖半径为 6.42 m。根据围岩级别并结合现场实际地质情况, 浅埋洞口段隧道开挖采用交叉中隔壁(CRD)法(图 2), 洞身段采用三台阶七步开挖法进行施工。其中, 中隔壁法施工工序为: (a) 施作超前支护①; (b) 开挖先行导坑上部 I; (c) 施作先行导坑上部初期支护②和临时支撑③; (d) 开挖先行导坑下部 II; (e) 施作先行导坑下部初期支护④和临时支撑⑤; (f) 开挖后行导坑上部 III; (g) 施作后行导坑上部初期支护⑥和临时支撑⑦; (h) 开挖后行导坑下部 IV; (i) 施作后行导坑下部初期支护⑧和临时支撑⑨; (j) 开挖仰拱 V; (k) 施作仰拱临时支撑⑩、初期支护⑪、混凝土衬砌⑫; (l) 拆除临时支撑③、⑤、⑦、⑨、⑩; (m) 仰拱回填⑬; (n) 整体模筑二次衬砌⑭。

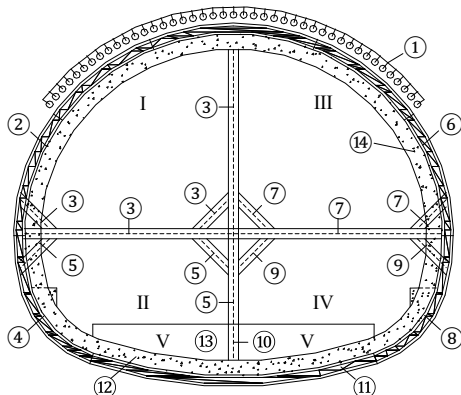


图 2 交叉中隔壁 (CRD) 法施工步骤

Fig. 2 Construction sequence of the CRD method

2 现场监测方案

为掌握浅埋洞口段隧道施工引起的周边位移变化规律, 在土坡地表沿隧道横断面间隔 5.0 m 布设地

表沉降监测点, 记为 DB0~DB6, 采用高精度全站仪测量。在隧道拱顶位置布设沉降监测点(测点 C), 采用精密水准仪量测。周边收敛测点布设在各断面跨度最大位置, 埋设 1 条水平收敛测量基线(AB 水平测线), 采用数显收敛计量测(图 3)。

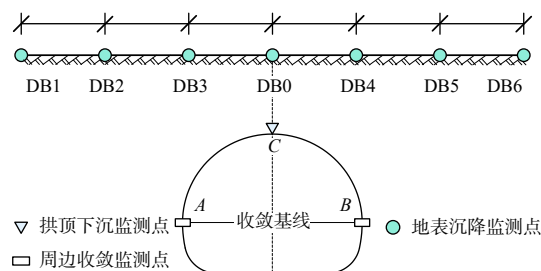


图 3 隧道周边位移监测点布设剖面图 (单位: m)

Fig. 3 Cross-sectional layout of the displacement monitoring points (unit: m)

3 测试结果分析

3.1 地表沉降分布规律

图 4 为不同测试断面地表沉降-历时曲线, 各测试断面地表沉降时态曲线分布变化基本一致, 地表沉降量随隧道开挖空间逐步增大呈增长趋势。随着支护结构封闭成环地表沉降速率逐渐减缓, 约 60 d 后地表沉降逐渐趋于稳定, 地表沉降最大值统计范围为 $(-30.78 \sim -105.20) \text{ mm}$ 。地表沉降时态曲线具有显著的时间效应和阶段效应, 其发展变化过程可分为快速增长阶段、持续发展阶段、稳定变形阶段; 地表沉降时态曲线与时间具有显著的非线性关系, 其发展过程可采用指数函数描述(式(1)), 且拟合函数与现场实测值具有较高的拟合优度, 见图 4(f)、表 1, 故可借助拟合函数对地表沉降时态曲线发展进行预测分析。

$$w = ae^{-t/b} + w_0 \quad (1)$$

式中: a 、 b 、 w_0 ——拟合常数。

图 5 为不同测试断面横向地表沉降曲线, 地表沉降曲线沿横向水平距离呈凹槽形分布, 随隧道开挖时间增长, 沉降槽加宽变深; 地表沉降沿隧道横断面影响范围为 $(3 \sim 5)B$ (隧道跨度), 拱顶正上方地表沉降量最大; 各测试断面地表沉降曲线分布趋势基本一致, 但也略有差异, 主要表现为左右两侧具有一定的非对称性, 见图 5(e), 原因是隧道分部开挖过程中的时间效应和空间效应所致。大量的工程实践表明, 横向地表沉降槽基本符合正态曲线分布, 即可采用典型的 Peck 公式进行预测:

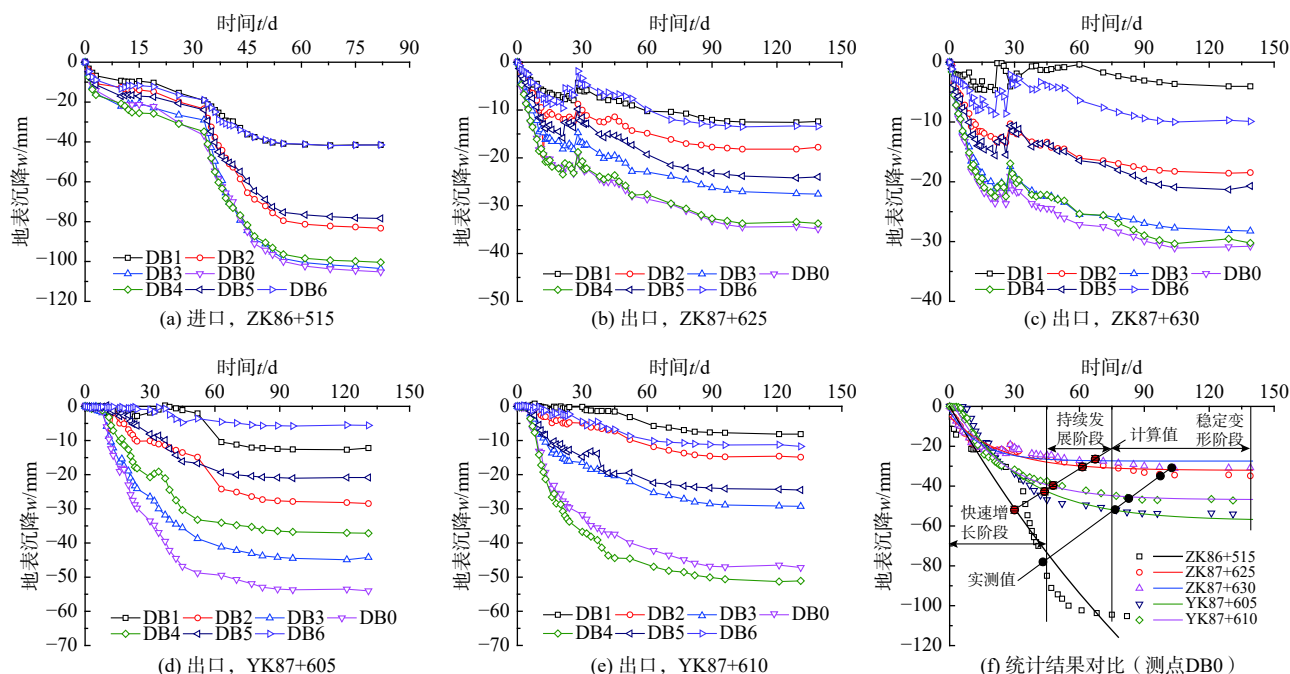


图 4 不同测试断面地表沉降-历时曲线分布规律

Fig. 4 Distribution curves of ground settlement with time of different monitoring sections

表 1 隧道开挖引起的地表沉降 (测点 DB0) 与时间的关系

Table 1 Fitting equations between ground settlement (point DB0) caused by tunnel excavation and time

测试断面	拟合函数: $w(t)=a*\exp(-t/b)+w_0$	R^2
ZK86+515	$w=304.32*\exp(-t/162.97)-304.36$	0.922
ZK87+625	$w=27.09*\exp(-t/23.86)-32.08$	0.908
ZK87+630	$w=25.15*\exp(-t/13.55)-27.43$	0.912
YK87+605	$w=64.81*\exp(-t/30.34)-57.35$	0.978
YK87+610	$w=51.59*\exp(-t/23.24)-46.82$	0.984

$$w(x) = -w_{\max} \exp\left(-\frac{x^2}{2i^2}\right) \quad (2)$$

$$w_{\max} = \frac{V_{\text{loss}}}{i\sqrt{2\pi}} \approx \frac{A\eta}{2.5i} \quad (3)$$

式中: $w(x)$ ——隧道开挖引起的地表沉降/m;

$w_{\max}$ ——地表沉降最大值/m;

x ——沿隧道横断面水平距离/m;

i ——地表沉降槽宽度系数/m;

V_{loss} ——隧道开挖引起单位长度的地层损失量/
($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-1}$);

η ——单位长度的地层体积损失率/%;

A ——隧道开挖断面面积/ m^2 。

各测试断面最终地表沉降分布曲线拟合结果对比见图 5(f) 与表 2。由表 2 可知, 地表沉降实测值与预测结果基本吻合, 隧道开挖引起的地层损失率可达 3.08%, 且预测模型可用于地表变形预测分析。

3.2 拱顶下沉分布规律

图 6 为不同测试断面拱顶下沉-历时曲线, 拱顶下沉随时间增长而增大, 在隧道开挖卸荷初期变形量呈线性增长, 随后变形速率逐渐减小, 下沉量呈持续增长趋势, 当达到一定时间后下沉量逐渐趋于稳定。以图 6(a) 为例, 其发展变化过程可分为线性增长、持续变形和平稳发展 3 个阶段。其中, 线性增长阶段持续时长为 6~12 d, 此阶段变形量为 (60%~80%) $v_{\max}$, 主要受隧道开挖卸荷作用影响变形速率较大, 故在施工过程中应快速开挖、及时施作支护结构封闭成环, 以控制围岩大变形; 持续变形阶段因初期支护结构逐步施作而发挥承载作用, 围岩变形速率减缓, 此阶段历时为 10~15 d, 变形量为 (20%~40%) $v_{\max}$; 隧道开挖 30 d 以后拱顶下沉逐渐趋于稳定, 即变形进入平稳发展阶段, 此阶段可作为二次衬砌结构的合理施作时机, 以避免隧道围岩变形继续发展。

拱顶下沉时态曲线符合指数函数型发展规律, 各测试断面拱顶下沉随时间变化关系拟合结果见表 3, 其拟合优度均达到 0.96 以上。拱顶下沉 $v_{\max}$ 的统计范围为 (-17.1~-201.1) mm, 其变形历时 15~45 d, 见图 6(e)。由于隧道施工变形受诸多因素影响, 其变形量具有一定的随机性, 假设其服从正态分布, 可对样本取 95% 的置信区间进行统计分析, 则可得一定置信水平的变形量置信上下限。根据图 6(e) 实测数据

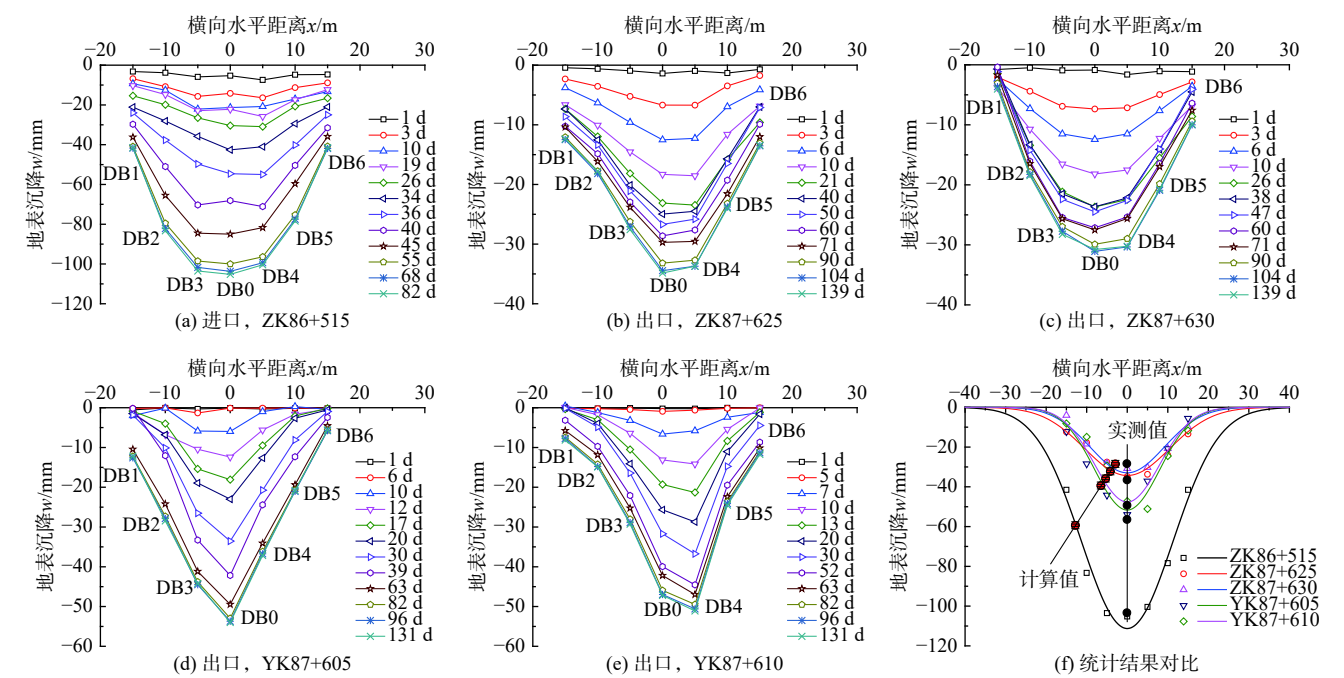


图 5 不同测试断面横向地表沉降曲线分布规律

Fig. 5 Distribution curves of transversal ground settlement of different monitoring sections

表 2 横向地表沉降分布曲线预测结果对比

测试断面	拟合函数: $w(x)=-a*\exp(-x^2/b)$	R^2	最大地表沉降计算值 w_c/mm	最大地表沉降实测值 w_{max}/mm	w_c/w_{max}	i/m	$\eta/\%$
ZK86+515	$w=-111.28*\exp(-x^2/254.33)$	0.958	111.28	105.20	1.058	11.28	3.08
ZK87+625	$w=-34.31*\exp(-x^2/218.54)$	0.903	34.31	34.85	0.985	10.45	0.88
ZK87+630	$w=-32.95*\exp(-x^2/167.65)$	0.931	32.95	30.78	1.071	9.16	0.74
YK87+605	$w=-51.70*\exp(-x^2/128.43)$	0.941	51.70	54.00	0.957	8.01	1.02
YK87+610	$w=-47.67*\exp(-x^2/127.03)$	0.787	47.67	47.18	1.010	7.97	0.93

统计分析可知,拱顶下沉 v_{max} 的 95% 置信区间为 $[-51.53, -65.11]$ 。拱顶下沉不超过 90.0 mm 的断面集中在埋深 $h \leq 3(H+B)$ 的隧道中,当隧道埋深 $h > 3(H+B)$ 时,拱顶下沉量呈增大趋势,见图 6(f),主要原因是随着隧道埋深增大,下部土体含水量较高(15.0% ~ 23.0%),土体稳定性差,隧道所受上覆荷载较大,因此变形较大。

图 7 为不同测试断面拱顶下沉速率-历时曲线,隧道开挖初始拱顶下沉速率急剧增加,而后随时间呈逐渐减缓趋势,其发展变化过程可分为急剧增长、快速衰减、缓慢衰减和平稳变化 4 个阶段,见图 7(a)。隧道开挖后拱顶下沉速率最大值为 $(-8.0 \sim -12.0) \text{ mm/d}$, 30 d 以后拱顶下沉速率基本达到稳定,除少数测点最终位移速率超过 -1.00 mm/d 以外,其余测点最终位移速率变化范围均为 $(-0.05 \sim -0.80) \text{ mm/d}$ 。由此说明,位移变化速率与围岩变形发展趋势密切相关,其大小是判别围岩稳定性的重要依据之一,且通过及时施作

与加强支护措施以降低围岩位移速率是防止隧道围岩大变形和失稳破坏的重要途径。

3.3 周边收敛变形分布规律

图 8 为不同测试断面周边收敛-历时曲线,周边收敛时态曲线分布亦可采用指数函数描述,其变化过程与拱顶下沉具有类似的发展规律;周边收敛变形量 u_{max} 的统计范围为 $(-12.1 \sim -122.0) \text{ mm}$,其变形历时为 15 ~ 45 d,见图 8(e)。根据实测数据统计分析可知, u_{max} 的 95% 置信区间为 $[-35.08, -43.39]$ 。当隧道埋深 $h \leq 3(H+B)$ 时,周边收敛变形不超过 75.0 mm,超过 75.0 mm 的断面集中在埋深 $h > 3(H+B)$ 的隧道中,见图 8(f)。拱顶下沉与周边收敛变形量对比可知(图 6、图 8),在同一测试断面拱顶下沉变形均高于周边收敛变形,因此隧道预留变形量应着重考虑拱顶下沉量的影响,并建议 V 级黄土围岩隧道预留变形量取值范围为 $(-100 \sim -150) \text{ mm}$ 。

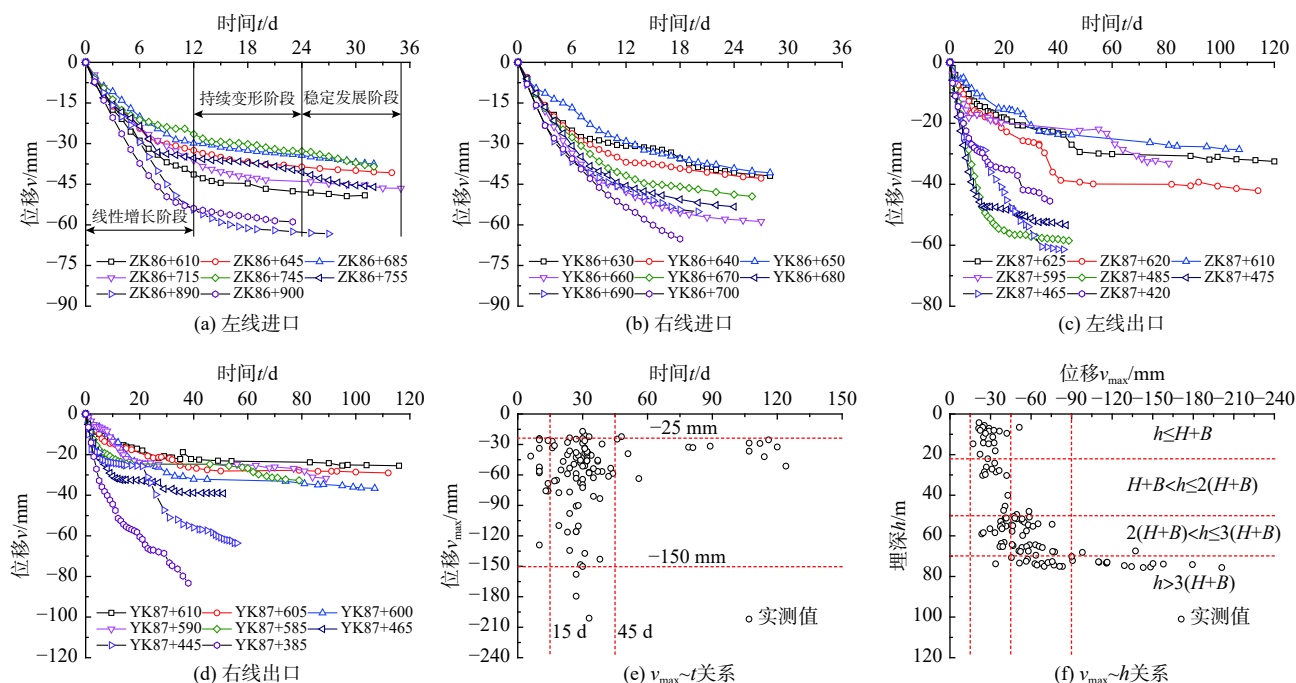


图 6 不同测试断面拱顶下沉-历时曲线分布规律

Fig. 6 Distribution curves of vault settlement with time of different monitoring sections

表 3 隧道开挖引起的拱顶下沉与时间的关系

Table 3 Fitting equations between vault settlement caused by tunnel excavation and time

测试断面	拟合函数: $v(t)=a \cdot \exp(-t/b)+v_0$	R^2
ZK86+610	$v=50.49 \cdot \exp(-t/6.75)-49.57$	0.998
ZK86+715	$v=47.73 \cdot \exp(-t/8.00)-46.96$	0.998
YK86+630	$v=37.95 \cdot \exp(-t/7.94)-40.80$	0.962
YK86+670	$v=51.17 \cdot \exp(-t/7.06)-50.56$	0.998
ZK87+485	$v=64.22 \cdot \exp(-t/8.36)-59.82$	0.984
ZK87+625	$v=29.21 \cdot \exp(-t/26.39)-32.09$	0.979
YK87+385	$v=76.46 \cdot \exp(-t/13.79)-81.24$	0.979
YK87+610	$v=22.07 \cdot \exp(-t/15.27)-24.33$	0.979

图 9 为不同测试断面周边收敛速率-历时曲线。由图 9 可得, 周边收敛速率时态曲线呈先增大而后逐渐衰减趋势, 在隧道开挖初始阶段周边收敛速率变化最大, 为 $(-4.0 \sim -6.0) \text{ mm/d}$; 30 d 以后周边收敛速率波动变化基本达到稳定, 各测点最终位移速率变化范围均为 $(-0.02 \sim -0.60) \text{ mm/d}$ 。对比拱顶下沉速率与周边收敛速率时态分布曲线(图 7、图 9)可知, 前者波动性相对较大, 说明隧道拱顶位置的受力变形对时空效应影响更为敏感, 即围岩变形呈现显著的时间和空间效应。在工程施工过程中, 应重视优化隧道开挖工序和科学把握施作支护结构时机, 以控制围岩变形, 确保隧道结构稳定。

4 结论

(1) 黄土隧道开挖引起的地表沉降随时间呈指数函数型分布, 其发展变化过程可分为快速增长阶段、持续发展阶段、稳定变形阶段; 地表沉降最大值的统计变化范围为 $(-30.78 \sim -105.20) \text{ mm}$, 约 60 d 后逐渐趋于稳定; 地表沉降曲线沿横向水平距离呈凹槽形分布, 可采用典型的 Peck 公式进行预测, 沉降槽宽度为 $(3 \sim 5)B$, 且隧道开挖引起的地层损失率为 $0.74\% \sim 3.08\%$ 。

(2) 拱顶下沉与周边收敛时态曲线均可采用指数函数描述, 其发展过程可分为线性增长、持续变形和平稳发展 3 个阶段, 其中线性增长阶段历时 6 ~ 12 d, 占变形总量的 $(60\% \sim 80\%)$, 持续变形阶段历时 10 ~ 15 d, 占变形量的 $(20\% \sim 40\%)$, 30 d 以后进入平稳发展阶段, 且此阶段可作为二次衬砌结构的合理施作时机, 以防止围岩变形继续发展。

(3) 拱顶下沉 $v_{\max}$ 的统计变化范围为 $(-17.1 \sim -201.1) \text{ mm}$, 其 95% 置信区间为 $[-51.53, -65.11]$; 周边收敛 $u_{\max}$ 的统计变化范围为 $(-12.1 \sim -122.0) \text{ mm}$, 其 95% 置信区间为 $[-35.08, -43.39]$; V 级围岩黄土隧道预留变形量建议取值范围为 $(-100 \sim -150) \text{ mm}$ 。

(4) 拱顶下沉与周边收敛速率时态曲线呈先急剧增加后逐渐衰减趋势, 其发展过程可分为急剧增长、

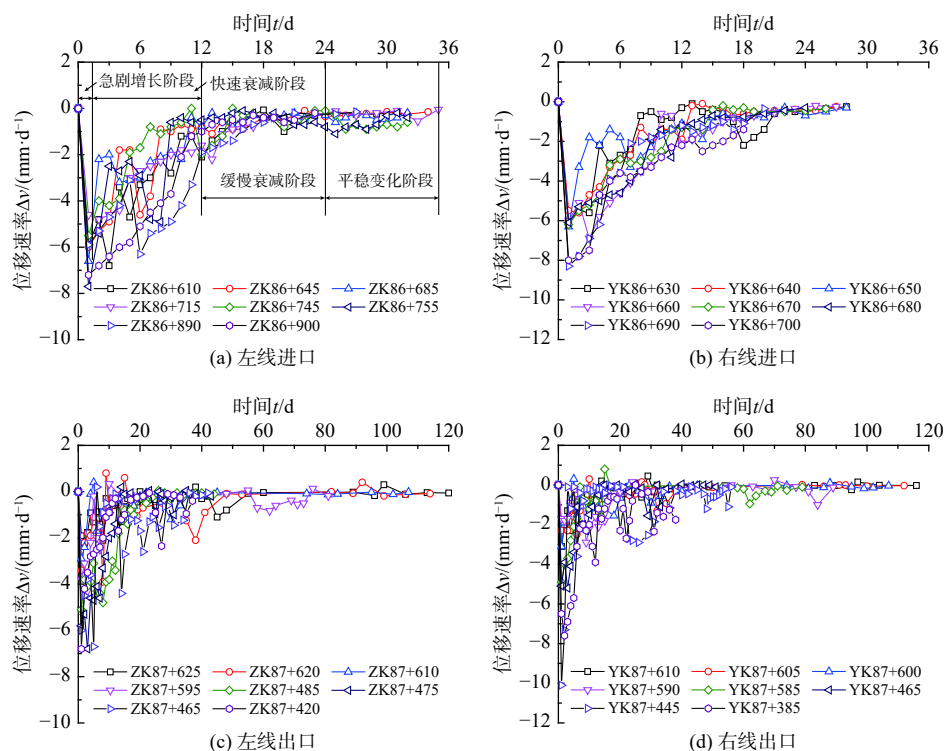


图 7 不同测试断面拱顶下沉速率-历时曲线分布规律

Fig. 7 Distribution curves of vault settlement rate with time of different monitoring sections

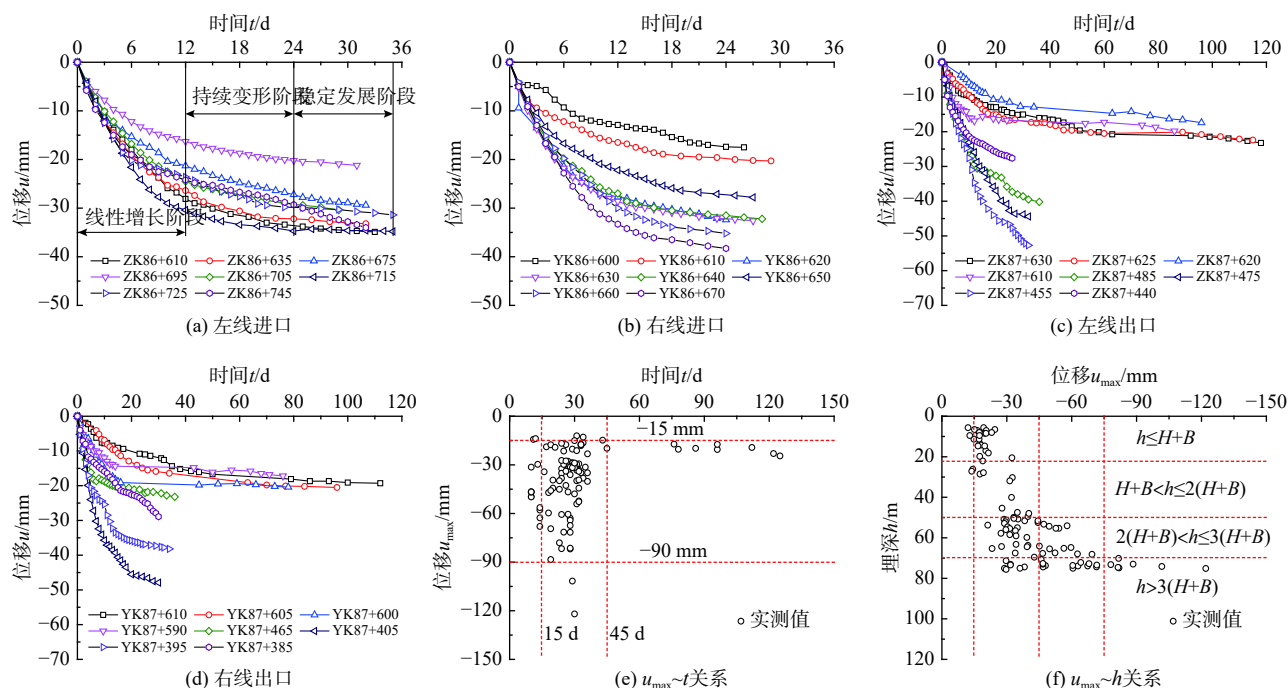


图 8 不同测试断面周边收敛-历时曲线分布规律

Fig. 8 Distribution curves of peripheral convergence with time of different monitoring sections

快速衰减、缓慢衰减和平稳变化 4 个阶段; 最终稳定后的拱顶下沉速率(Δv)和周边收敛速率(Δu)依次为 $(-0.05 \sim -0.80) \text{ mm/d}$ 和 $(-0.02 \sim -0.60) \text{ mm/d}$; 位移速

率大小可作为判别围岩稳定性的重要依据之一, 且通过及时施作与加强支护措施以降低围岩位移速率是防止隧道围岩大变形和失稳破坏的重要途径。

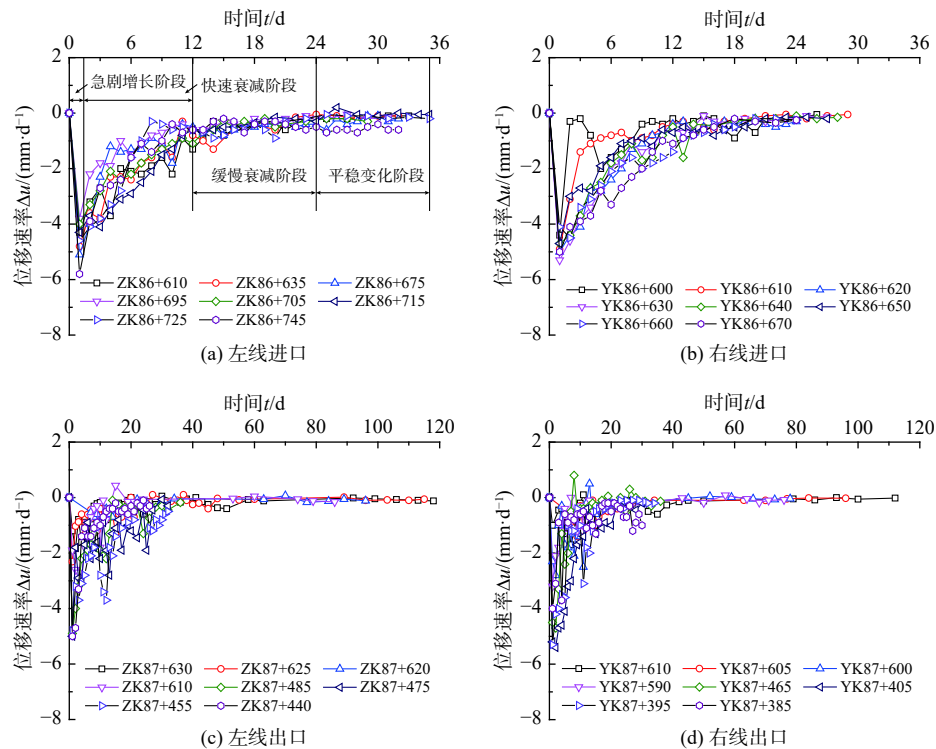


图 9 不同测试断面周边收敛速率-历时曲线分布规律

Fig. 9 Distribution curves of peripheral convergence rate with time of different monitoring sections

参考文献 (References):

- [1] 江金硕, 李荣建, 刘军定, 等. 基于黄土联合强度的黄土隧道围岩应力及位移研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(增刊2): 189 - 192. [JIANG Jinshuo, LI Rongjian, LIU Junding, et al. Stress and displacement of surrounding rock of loess tunnels based on joint strength[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(Sup2): 189 - 192. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 干啸洪, 陈立平, 张素磊, 等. 浅埋偏压隧道地表沉降规律及其预测方法[J]. 现代隧道技术, 2019, 56(2): 78 - 84. [GAN Xiaohong, CHEN Liping, ZHANG Sulei, et al. On law of ground settlements and its prediction method for the shallow-buried tunnel under asymmetrical pressures[J]. Modern Tunnelling Technology, 2019, 56(2): 78 - 84. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 李骏, 邵生俊, 李国良, 等. 黄土隧道的湿陷变形规律及其对衬砌结构的作用[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(1): 251 - 260. [LI Jun, SHAO Shengjun, LI Guoliang, et al. Collapse deformation of loess tunnel and its effect[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(1): 251 - 260. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 胡炜, 谭信荣, 蒋尧, 等. 深埋顺层偏压隧道围岩破坏机理及规律研究——以郑万线某隧道为例[J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(3): 60 - 68. [HU Wei, TAN Xinrong, JIANG Yao, et al. A study of the mechanism and regularity of failures in the surrounding rock of a deep buried bias tunnel embedded in geologically bedding strata: taking one tunnel of the Zhengwan line as an example[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(3): 60 - 68. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 董林, 王兰民, 夏坤, 等. 原状黄土遇水及饱和后软化特征研究[J]. 水文地质工程地质, 2016, 43(3): 148 - 152. [DONG Lin, WANG Lanmin, XIA Kun, et al. A study of soften characteristics of wet and saturated loess[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2016, 43(3): 148 - 152. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 陈建勋, 王梦恕, 轩俊杰, 等. 两车道公路黄土隧道变形规律[J]. 交通运输工程学报, 2012, 12(3): 9 - 18. [CHEN Jianxun, WANG Mengshu, XUAN Junjie, et al. Deformation rule of loess highway tunnel with two lanes[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2012, 12(3): 9 - 18. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 乔雄, 陈建勋, 王梦恕. 黄土公路隧道洞口段变形规律测试研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(增刊

- 2): 3552 – 3556. [QIAO Xiong, CHEN Jianxun, WANG Mengshu. Test study of deformation law of entrance section for loess highway tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(Sup2): 3552 – 3556. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 扈世民, 张顶立, 郭婷, 等. 大断面黄土隧道变形特征分析[J]. 铁道学报, 2012, 34(8): 117 – 122. [HU Shimin, ZHANG Dingli, GUO Ting, et al. Analysis on deformation characteristics of large-section loess tunnel[J]. Journal of the China Railway Society, 2012, 34(8): 117 – 122. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 李志清, 丁春林, 窦世学, 等. 大断面浅埋黄土隧道围岩变形特性分析[J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(增刊1): 1623 – 1628. [LI Zhiqing, DING Chunlin, DOU Shixue, et al. Analysis on deformation characteristics of surrounding rock in large section shallow loess tunnels[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2014, 10(Sup1): 1623 – 1628. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 孟德鑫, 谭忠盛. 大断面黄土隧道变形控制技术及其支护受力特征[J]. 土木工程学报, 2015, 48(增刊1): 383 – 387. [MENG Dexin, TAN Zongsheng. Deformation control technology and supporting structure stress of large section loess tunnel[J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(Sup1): 383 – 387. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 赖金星, 樊浩博, 来弘鹏, 等. 软弱黄土隧道变形规律现场测试与分析[J]. 岩土力学, 2015, 36(7): 2003 – 2012. [LAI Jinxing, FAN Haobo, LAI Hongpeng, et al. In-situ monitoring and analysis of tunnel deformation law in weak loess[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(7): 2003 – 2012. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 孔庆祥. 铁路黄土隧道变形规律及建设管理要点研究[J]. 现代隧道技术, 2019, 56(2): 18 – 23. [KONG Qingxiang. Study on deformation law and key points of construction management of loess tunnels[J]. Modern Tunnelling Technology, 2019, 56(2): 18 – 23. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 尚海松, 曹海静, 周济兵. 蒙华铁路隧道施工变形监测数据统计分析[J]. 现代隧道技术, 2019, 56(增刊1): 66 – 72. [SHANG Haisong, CAO Haijing, ZHOU Jibing. Statistical analysis of monitored deformation data of Menghua railway tunnels during construction[J]. Modern Tunnelling Technology, 2019, 56(Sup1): 66 – 72. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 周鹏, 高金仓, 李磊, 等. 穿越陡坎地形的偏压黄土隧道大变形时空特征研究[J]. 隧道建设(中英文), 2020, 40(5): 652 – 659. [ZHOU Peng, GAO Jincang, LI Lei, et al. Temporal and spatial characteristics of large deformation of unsymmetrically-pressured loess tunnel passing through scarp terrain[J]. Tunnel Construction, 2020, 40(5): 652 – 659. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 刘小伟, 原鹏博, 湛文武, 等. Q2饱和黄土隧洞围岩变形特征研究[J]. 冰川冻土, 2019, 41(6): 1422 – 1429. [LIU Xiaowei, YUAN Pengbo, CHEN Wenwu, et al. Study on characteristic of deformation of Q2 saturated loess tunnel's surrounding rock[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2019, 41(6): 1422 – 1429. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 李明, 严松宏, 潘春阳, 等. 富水大断面黄土隧道开挖流固耦合效应分析[J]. 现代隧道技术, 2019, 56(4): 81 – 88. [LI Ming, YAN Songhong, PAN Chunyang, et al. Analysis of fluid-solid coupling effect during excavation of the water-rich large-section loess tunnel[J]. Modern Tunnelling Technology, 2019, 56(4): 81 – 88. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 王道远, 袁金秀, 朱永全, 等. 硬塑-流塑浅埋黄土隧道变形特性及合理预留变形量模型试验研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(10): 3813 – 3822. [WANG Daoyuan, YUAN Jinxiu, ZHU Yongquan, et al. Model test study of deformation characteristics and reasonable reserved deformation of shallow-buried loess tunnel with hard-flow plastic[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(10): 3813 – 3822. (in Chinese with English abstract)]

编辑: 张明霞