



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2404668

引用格式:杨潇,宋新宇,张伟列,等.基于监控量测的软岩隧道侧压力系数反演与应用:以宗思隧道为例[J].科学技术与工程,2025,25(13):5634-5642.

Yang Xiao, Song Xinyu, Zhang Weilie, et al. Inversion and application of lateral pressure coefficient in soft rock tunnels based on on-site monitoring data: a case study of the Zongsi tunnel[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(13): 5634-5642.

## 基于监控量测的软岩隧道侧压力系数反演与应用:以宗思隧道为例

杨潇<sup>1</sup>, 宋新宇<sup>2</sup>, 张伟列<sup>3</sup>, 李勇志<sup>1</sup>, 杨凯<sup>2,3\*</sup>, 晏启祥<sup>3</sup>

(1. 中电建重庆勘测设计研究院有限公司, 重庆 401329; 2. 西华大学建筑与土木工程学院, 成都 610039;

3. 西南交通大学交通隧道工程教育部重点实验室, 成都 610031)

**摘要** 侧压力系数对隧道围岩变形和支护结构力学响应具有重要的影响,准确得到隧址区侧压力系数 $\lambda$ 可有效指导隧道的设计与施工。首先从理论角度分析了侧压力系数对隧道拱顶沉降位移和边墙水平位移的影响;其次,通过监控量测得到隧道边墙水平位移与拱顶沉降位移的比值,并结合数值模拟手段,建立了水平-竖向位移系数 $K$ 与侧压力系数 $\lambda$ 之间的数学关系,从而实现了侧压力系数的反演;最后,将反演得到的侧压力系数应用于隧道断面的优化设计。研究表明:在相同的地质条件下, $K$ 与 $\lambda$ 近似呈线性关系;无论隧道的埋深或围岩条件如何变化,水平位移与沉降位移之间始终存在比例关系,可用于隧址区侧压力系数的反演;根据监控量测数据反演得到隧道侧压力系数为1.1,施工中通过不断调整隧道轴比 $m$ ,使其逐渐趋近于 $\lambda^{-1}$ ,有效控制了隧道变形,降低了衬砌变形破坏比例。

**关键词** 软岩隧道;侧压力系数;水平-竖向位移系数;反演;隧道轴比

**中图分类号** U45; **文献标志码** A

## Inversion and Application of Lateral Pressure Coefficient in Soft Rock Tunnels Based on On-site Monitoring Data: A Case Study of the Zongsi Tunnel

YANG Xiao<sup>1</sup>, SONG Xin-yu<sup>2</sup>, ZHANG Wei-lie<sup>3</sup>, LI Yong-zhi<sup>1</sup>, YANG Kai<sup>2,3\*</sup>, YAN Qi-xiang<sup>3</sup>

(1. Power China Chongqing Engineering Co., Ltd., Chongqing 401329, China;

2. School of Architecture and Civil Engineering, Xihua University, Chengdu 610039, China;

3. Key Laboratory of Transportation Tunnel Engineering, Ministry of Education, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**[Abstract]** During tunnel construction, the deformation of surrounding rock and the mechanical response of the supporting structures are significantly influenced by the lateral pressure coefficient  $\lambda$ . Accurate determination of the on-site lateral pressure coefficient is essential for guiding tunnel design and construction. Firstly, the impact of the lateral pressure coefficient on settlement displacement of the tunnel vault and horizontal displacement of the side walls was analyzed theoretically. Secondly, the ratio between horizontal displacement of the side walls and settlement displacement of the vault was monitored, and a numerical simulation was employed to establish a mathematical relationship between the horizontal-vertical displacement coefficient  $K$  and the lateral pressure coefficient  $\lambda$ , enabling the inversion of the lateral pressure coefficient. Finally, the inverted lateral pressure coefficient was applied to optimize tunnel cross-section design. The results indicate that, under the same geological conditions, an approximately linear relationship exists between  $K$  and  $\lambda$ . Regardless of changes in tunnel depth or surrounding rock conditions, a proportional relationship between horizontal and settlement displacements is maintained, which can be used to invert the lateral pressure coefficient at the tunnel site. By adjusting the tunnel axis ratio  $m$  to gradually approach  $\lambda^{-1}$ , deformation is effectively controlled and the proportion of lining damage is reduced.

**[Keywords]** soft rock tunnel; lateral pressure coefficient; horizontal-vertical displacement coefficient; inversion; tunnel axis ratio

隧道开挖前,岩体由于自重和地质构造活动的影响,已经存在一定的地应力,这称为初始地应力。

开挖扰动引起围岩应力重分布,导致围岩向临空面的移动,甚至会引起破裂或坍塌。支护结构施作

收稿日期:2024-06-21 修订日期:2025-02-06

基金项目:国家自然科学基金(U21A20152)

第一作者:杨潇(1991—),男,汉族,四川犍为人,工程师。研究方向:岩土结构。E-mail:tomyang@qq.com。

\*通信作者:杨凯(1987—),男,汉族,四川广元人,博士,讲师。研究方向:隧道工程。E-mail:87642189@qq.com。

后,部分围岩荷载转移到支护结构上。因而,隧道围岩的稳定性与支护结构的安全性及地应力状态密切相关。开展现场测量是获取地应力分布规律最直接的手段,隧道工程中最为常用的方法是水压致裂法<sup>[14]</sup>。然而,现场地应力测量工作耗时耗力,测量结果具有一定的误差。因此,部分学者结合监控量测手段和数值模拟方法,采用位移反分析法来反演地应力场<sup>[5-7]</sup>。但是,随着隧道向前施工,掌子面的埋深和围岩岩性不断发生变化,致使开挖后围岩位移的变化范围较大,这种特征在软弱破碎围岩的隧道更为明显<sup>[8]</sup>。例如,成兰铁路的杨家坪隧道和茂县隧道,严重变形段边墙位移的最小值为66.2 mm,最大值为562.0 mm,相差近8.5倍<sup>[9]</sup>。在这种情况下,难以确定代表性断面进行位移反分析,对位移反分析法的应用提出了挑战。

由于隧道的纵向尺寸远大于横断面尺寸,隧道围岩与支护结构相互作用的力学模型可视为平面应变模型,模型所受地应力包括垂直应力和水平应力。实测地应力数据表明,垂直应力 $\sigma_v$ 基本等于上覆岩层的重量;水平应力 $\sigma_h$ 则受地质构造活动、地形地貌演化及岩层物理力学特性的影响,变化范围较大;水平应力与垂直应力的比值,即侧压力系数 $\lambda$ ,一般分布在0.5~5.5<sup>[10]</sup>。隧道开挖过程中,围岩变形和支护结构的破坏失稳在本质上是由能量驱动,而地应力则是能量的直接来源<sup>[11]</sup>。地应力场的侧压力系数 $\lambda$ 对隧道围岩变形<sup>[12-15]</sup>、支护结构力学响应<sup>[16-18]</sup>、围岩压力分布<sup>[19]</sup>等方面都有着重要的影响。因此,准确得到地应力分布特征,特别是侧压力系数 $\lambda$ 的大小,对隧道工程的设计与施工具有重要的意义。

现以丽香铁路宗思隧道为依托,首先采用理论分析探讨侧压力系数 $\lambda$ 对圆形隧道边墙水平位移与拱顶沉降位移之比的影响。在此基础上,对现场监控量测数据进行拟合,得到了隧道水平位移与竖向位移的比值。随后,通过隧道开挖数值模拟手段,建立了边墙水平位移与拱顶竖向位移之比与侧压力系数 $\lambda$ 的函数关系,据此得出隧道现场的侧压力系数。最终,将反演得到的侧压力系数应用于隧道断面的优化设计,显著降低隧道衬砌破坏的比例,从而提高施工安全性和经济性。以期类似工程地质条件隧道的设计与施工提供一定的参考。

### 1 侧压力系数对隧道围岩塑性变形的影响

假设圆形隧道的半径为 $R_0$ ,垂直应力为 $p_0$ ,侧压力系数为 $\lambda$ ,即水平应力为 $\lambda p_0$ ,如图1(a)所示。

对于软弱破碎围岩隧道,开挖后围岩进入塑性状态时,隧道的位移通常较大,其位移通式<sup>[20]</sup>为

$$u = \frac{1 + \nu}{2Er} [R_p^2 + (1 + \lambda)R_p f(\theta)] \{ \sin\varphi [p_0(1 + \lambda) + 2c \cot\varphi] [1 + \frac{(1 - \lambda) \sin\varphi}{R_p(1 - \sin\varphi)} f(\theta)] - p_0(1 - \lambda) \cos(2\theta) \} \quad (1)$$

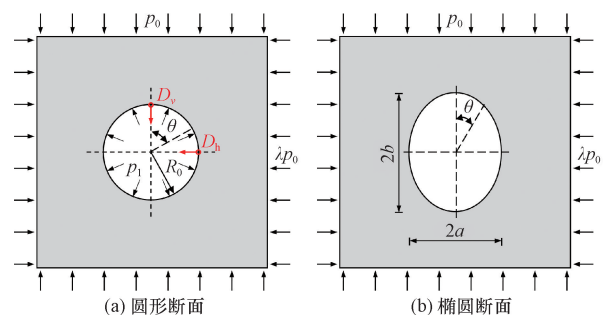
式(1)中:

$$R_p = R_0 \left\{ \frac{[p_0(1 + \lambda) + 2c \cot\varphi](1 - \sin\varphi)}{2p_1 + 2c \cot\varphi} \right\}^{\frac{1 - \sin\varphi}{2 \sin\varphi}} \quad (2)$$

$$f(\theta) = \frac{2R_p(1 - \sin\varphi)p_0}{[p_0(1 + \lambda) + 2c \cot\varphi] \sin\varphi} \cos(2\theta) \quad (3)$$

式(3)中: $r$ 为自隧道洞室中心算起的径向距离;隧道围岩塑性变形位移与围岩的弹性模量 $E$ 、泊松比 $\nu$ 、内摩擦角 $\varphi$ 、内聚力 $c$ 、支护阻力 $p_1$ 、竖向应力 $p_0$ 和侧压力系数 $\lambda$ 相关。当弹性模量 $E$ 、泊松比 $\nu$ 、内摩擦角 $\varphi$ 、内聚力 $c$ 、支护阻力 $p_1$ 、竖向应力 $p_0$ 等参数保持不变时,隧道位移主要受侧压力系数 $\lambda$ 的影响。

在隧道施工过程中,支护参数会根据地质条件不断调整优化,支护阻力 $p_1$ 是一个变化量。因此,假设圆形隧道半径为4.5 m、埋深为100 m,分别取 $p_1$ 为100、200、300、400、500 kPa,分析 $p_1$ 下 $\lambda$ 对隧道变形的影响,采用的围岩参数如表1所示。不同支护阻力作用下隧道拱顶沉降位移 $D_v$ 与侧压力系数 $\lambda$ 的关系如图2(a)所示。结果表明, $p_1$ 相同时, $D_v$ 随 $\lambda$ 的增大而增大; $\lambda$ 相同时, $D_v$ 随 $p_1$ 的增大而减小。 $\lambda$ 与 $D_h$ 的关系如图2(b)所示,与 $D_v$ 表现出近似的变化趋势,即 $p_1$ 相同时, $D_h$ 随 $\lambda$ 的增大而增大,但其增速明显大于 $D_v$ 的增速,这表明 $\lambda$ 对水平位移的影响更大; $\lambda$ 相同时, $D_h$ 随 $p_1$ 的增大而减小。为分析 $D_h$ 与 $D_v$ 的相对变化关系,定义 $D_h$ 与 $D_v$ 的比值为水平-竖向位移系数 $K$ 。通过计算发现, $\lambda$ 相同时,改变 $p_1$ 得到的



$D_v$ 为拱顶沉降位移; $D_h$ 为水平位移; $\theta$ 为沿顺时针方向与垂直方向的夹角; $b$ 为椭圆垂直轴长; $a$ 为水平轴长

图1 隧道开挖力学分析模型

Fig. 1 Mechanical model of tunnel excavation

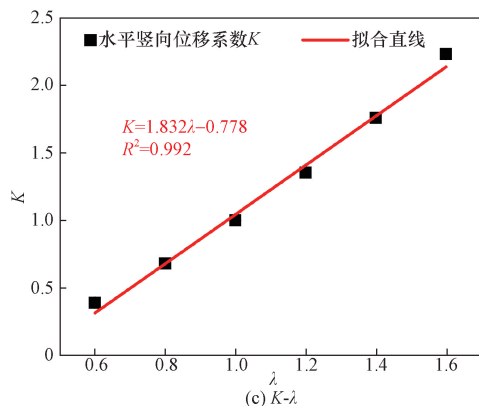
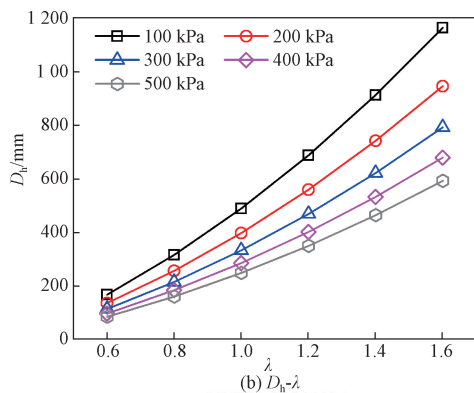
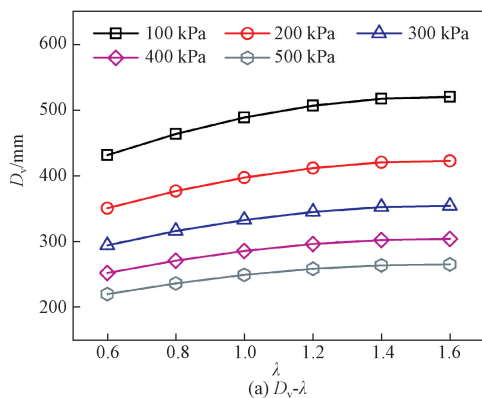


图2 侧压力系数  $\lambda$  对隧道变形的影响

Fig. 2 Influence of lateral pressure coefficient  $\lambda$  on tunnel deformation

$K$  完全相等,说明  $p_1$  不影响  $\lambda$  与  $K$  的关系。取  $p_1$  为 300 kPa 时,  $K$  与  $\lambda$  的关系如图 2(c) 所示。可知,  $K$  随  $\lambda$  近似线性增大。上述分析结果表明, 在相同的地质条件下,  $K$  与  $\lambda$  近似呈线性关系, 这为隧址区  $\lambda$  的反演奠定了理论基础。

## 2 软弱破碎围岩隧道侧压力系数反演

在隧道施工现场开展监控量测工作, 根据监测数据可以计算出  $K$ 。然后, 可以利用数值模拟手段, 建立起  $K$  与  $\lambda$  之间的函数关系, 并最终实现隧址区  $\lambda$  的反演分析。

表 1 围岩与支护结构的力学参数

Table 1 Mechanical parameters of surrounding rock and supporting structure

材料种类	弹性模量 $E/\text{GPa}$	泊松比 $\nu$	容重 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	内聚力 $c/\text{MPa}$	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$
围岩	0.08	0.35	27	0.22	27
喷射混凝土	28	0.2	22	—	—
锚杆、钢拱架	210	0.3	79	—	—

### 2.1 工程背景

宗思隧道是一条穿越炭质页岩地层的单线铁路隧道, 是丽江至香格里拉铁路的一项关键控制工程。该隧道全长 2 205 m, 最大埋深为 190 m, 初步设计的断面高度为 996 cm, 宽度为 685 cm, 采用三台阶法施工。然而, 隧道所在的地理位置极为特殊, 位于云南西部的地震活跃区域, 地处青藏高原的东南边缘与横断山脉的中段。受地质条件和构造活动的影响, 隧址区内岩层扭曲变形严重, 节理裂隙发育, 结构松散破碎, 岩体强度低, 浸水后立即出现软化泥化现象, 具有塑性流动与蠕变变形的特性。施工初期, 由于对围岩性质认识不足, 采用了常规设计参数, 导致支护结构承载力不足, 隧道变形量大、变形速度快且持续时间长。随着变形的不断增加, 大变形问题越发严重, 钢拱架发生扭曲, 衬砌也出现开裂, 大量段落发生衬砌侵限现象, 给整个工程的顺利施工带来了极大的挑战。

### 2.2 隧道变形监控量测

根据隧道断面形状和施工方法, 对隧道的拱顶沉降位移、上台阶和中台阶的水平位移进行了监测, 监测点的布置如图 3 所示。拱顶沉降位移为  $A$ , 以  $B_1$  和

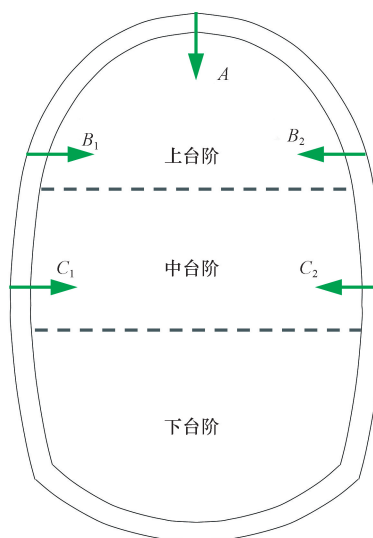
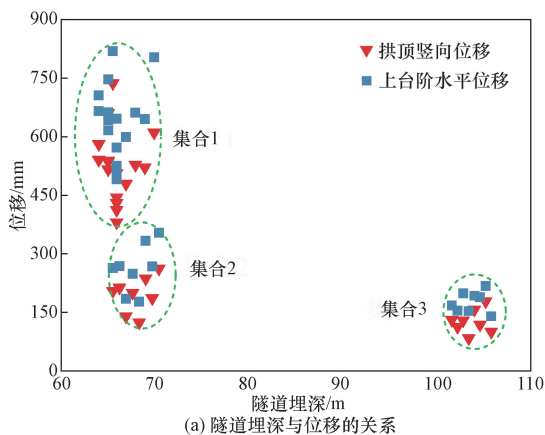


图3 隧道变形监测点布置

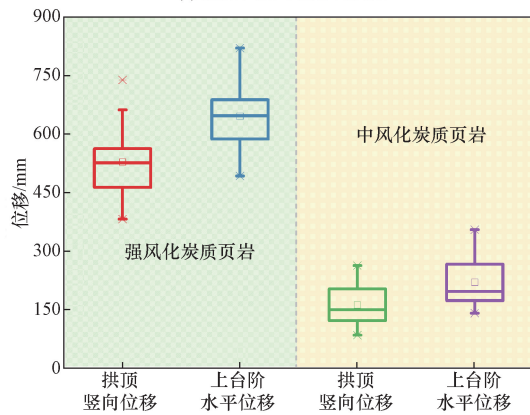
Fig. 3 Layout of tunnel deformation monitoring points

$B_2$ 的平均值为上台阶水平位移  $B$ , 以  $C_1$  和  $C_2$  的平均值为中台阶水平位移  $C$ , 即上台阶水平位移  $B = (B_1 + B_2)/2$ , 中台阶水平位移  $C = (C_1 + C_2)/2$ 。

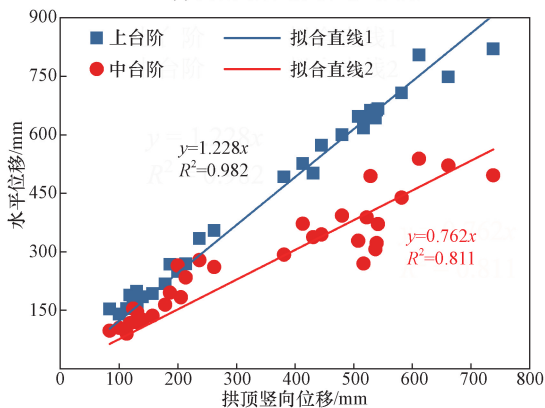
通过对 32 个断面的位移数据进行统计, 得到了隧道变形量与深度的关系, 如图 4(a) 所示。可以看出散点分布形成了 3 个集合: 集合 1 表示隧道断面埋深不大, 但变形量非常大; 集合 2 表示隧道断面埋深不大, 变形量也不大; 集合 3 表示隧道断面埋深较大, 但变形量不大。其中, 集合 1 和集合 2 的隧道深度差别不大, 但变形量差异显著; 集合 3 与集合 2 相比, 隧道埋深增加约 40 m, 但变形量却略有降低。结



(a) 隧道埋深与位移的关系



(b) 围岩风化程度与位移的关系



(c) 隧道水平位移与竖向位移的关系

图 4 监测的隧道变形特征

Fig. 4 Deformation characteristics of the monitored tunnel

果表明, 隧道埋深不是影响宗思隧道变形量的主要因素。隧道变形量与围岩风化程度的关系如图 4(b) 所示。可以看出, 强风化围岩的变形量显著高于中风化围岩。这说明风化作用降低了围岩的力学性能, 从而导致隧道开挖后的变形值显著增大, 甚至出现了埋深较小但变形量更大的情况, 这说明围岩的风化状况对隧道变形有着显著的影响。

水平位移与竖向位移的关系如图 4(c) 所示。可以看出, 隧道拱顶竖向位移、上台阶水平位移和中台阶水平位移的最大值分别为 737.3、819.0 和 538.1 mm, 最小值分别为 83.9、153.2 和 90.3 mm。这是由于隧道掘进工作面的围岩状况在强风化和中风化之间变化, 导致监测位移的最大值和最小值差异明显。通过分析上台阶、中台阶水平位移与拱顶沉降位移的统计关系发现, 隧道的水平位移和竖向位移之间存在一定的比例关系。其中, 上台阶水平位移约为拱顶沉降位移  $A$  的 1.228 倍, 即  $B = 1.228A$ , 拟合得到的平方相关系数  $R^2$  达到 0.982; 中台阶水平位移约为拱顶沉降位移的 76.2%, 即  $C = 0.762A$ , 拟合的  $R^2$  为 0.811。这说明拱顶沉降位移与上台阶水平位移的相关性高于与中台阶水平位移的相关性, 这主要是因为中台阶位移的测量滞后于该断面上台阶位移的测量, 中台阶开始位移测量时已经产生了较大变形, 存在一部分无法测量到的逸失位移; 隧道的水平位移始终大于竖向位移, 即水平方向是隧道变形的主方向。由现场监控量测结果可知, 无论隧道的埋深变化, 还是围岩条件变化, 隧道的水平位移始终与沉降位移存在比例关系; 由于上台阶水平位移测点和拱顶沉降位移测点同时安装, 而中台阶水平位移测点安装滞后, 上台阶水平位移与沉降位移的线性关系比中台阶更显著。

### 2.3 侧压力系数的反演

为建立侧压力系数  $\lambda$  与隧道水平-竖向位移系数  $K$  的关系, 建立隧道三维数值分析模型, 选取侧压力系数  $\lambda$  分别为 0.6、0.8、1.0、1.2、1.4、1.6 进行模拟。数值模型的长为 60 m、宽为 100 m、高为 100 m, 如图 5(a) 所示。围岩采用实体单元, 衬砌采用 shell 单元, 锚杆采用 cable 单元, 如图 5(b) 所示。此外, 采用等效刚度法将钢拱架的支护效果折算进混凝土衬砌中。围岩采用 Mohr-Coulomb 本构模型, 喷射混凝土和锚杆采用弹性本构模型。参数的选择参考了《铁路隧道设计规范》(TB 10003—2016)<sup>[21]</sup> 和《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)<sup>[22]</sup>, 围岩及支护结构参数如表 1 所示。以埋深为 100 m 处的隧道断面为研究对象, 模型所施加的

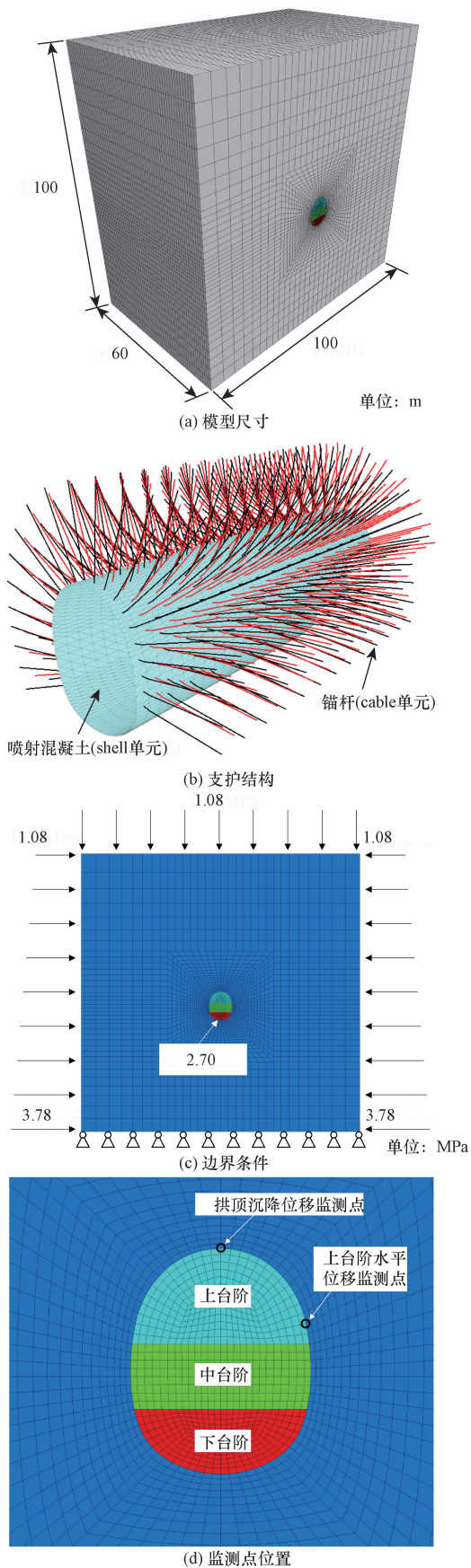


图5 隧道开挖数值模型

Fig. 5 Numerical model of tunnel excavation

边界条件如图 5(c) 所示。在模型顶面施加 1.08 MPa 的应力,模拟 40 m 厚岩层产生的重力应力。其余 5 个面施加位移边界条件,固定前、后、左、右和底面的法向位移,同时在模型中施加随深度增大的构造应力,以实现不同的侧压力系数。开挖过程中,监测拱顶沉降位移和上台阶水平位移,如图 5(d) 所示。

不同侧压力系数下隧道围岩的总体位移如图 6 所示,它能够直观地反映出围岩的变形特征。具体来说,当  $\lambda < 1$  时,竖直方向上主应力更大,围岩变形的优势方向在竖直方向上;当  $\lambda > 1$  时,水平方向上主应力更大,围岩变形的优势方向在水平方向上;当  $\lambda = 1$  时,围岩处于静水压力状态,围岩变形在水平方向和竖直方向上分布近似相等,不存在变形优势方向。结果表明侧压力系数  $\lambda$  直接影响隧道变形特性,变形的优势方向始终平行于主应力大的方向。在不同  $\lambda$  下,实测了数值模型拱顶竖向位移  $A$  和台阶顶面水平位移  $B$ ,得到了侧压力系数与隧道变形的关系曲线,如图 7(a) 所示。随着  $\lambda$  的增大, $A$  和  $B$  均增大,但水平位移增长幅度更大。 $\lambda$  与  $K$  的关系如图 7(b) 所示,可以看出, $K$  随  $\lambda$  呈线性增长,与第 2 部分的理论分析结果一致。 $K$  与  $\lambda$  的关系可拟合为

$$K = 0.699\lambda + 0.464 \quad (4)$$

现场监控量测数据的统计分析结果表明, $B = 1.228A$ ,即  $K = 1.228$ ,将其代入式(4)得到  $\lambda$  为 1.1。

### 3 侧压力系数的工程应用

传统的隧道支护理论认为围岩是支护体系荷载的来源,而新奥法(new Austrian tunnelling method, NATM)将围岩与支护结构视为一个整体,围岩既是荷载的来源,也是支护体系的一部分。通过优化隧道断面参数,可以增强围岩的自支承作用,降低软岩隧道的支护难度。对于椭圆形隧道,如图 1(b) 所示。围岩的切向应力  $\sigma_\theta$  可表示为

$$\sigma_\theta = p_0 \frac{m^2 \sin^2 \theta + 2m \sin^2 \theta - \cos^2 \theta}{\cos^2 \theta + m^2 \sin^2 \theta} + \lambda p_0 \frac{\cos^2 \theta + 2m \cos^2 \theta - m^2 \sin^2 \theta}{\cos^2 \theta + m^2 \sin^2 \theta} \quad (5)$$

式(5)中: $m$  为轴比,即椭圆竖直轴  $b$  与水平轴  $a$  之间的比率, $m = b/a$ 。

令设  $m = \lambda^{-1}$  (即  $a/b = \lambda$ ),式(5)可简化为

$$\sigma_\theta = p + \lambda p \quad (6)$$

由式(6)可知,当  $m = \lambda^{-1}$  时,隧道围岩的切向应力  $\sigma_\theta$  既不随  $\theta$  发生变化,也不存在极值,这种状态有利于隧道自支承作用的发挥和围岩的稳定。

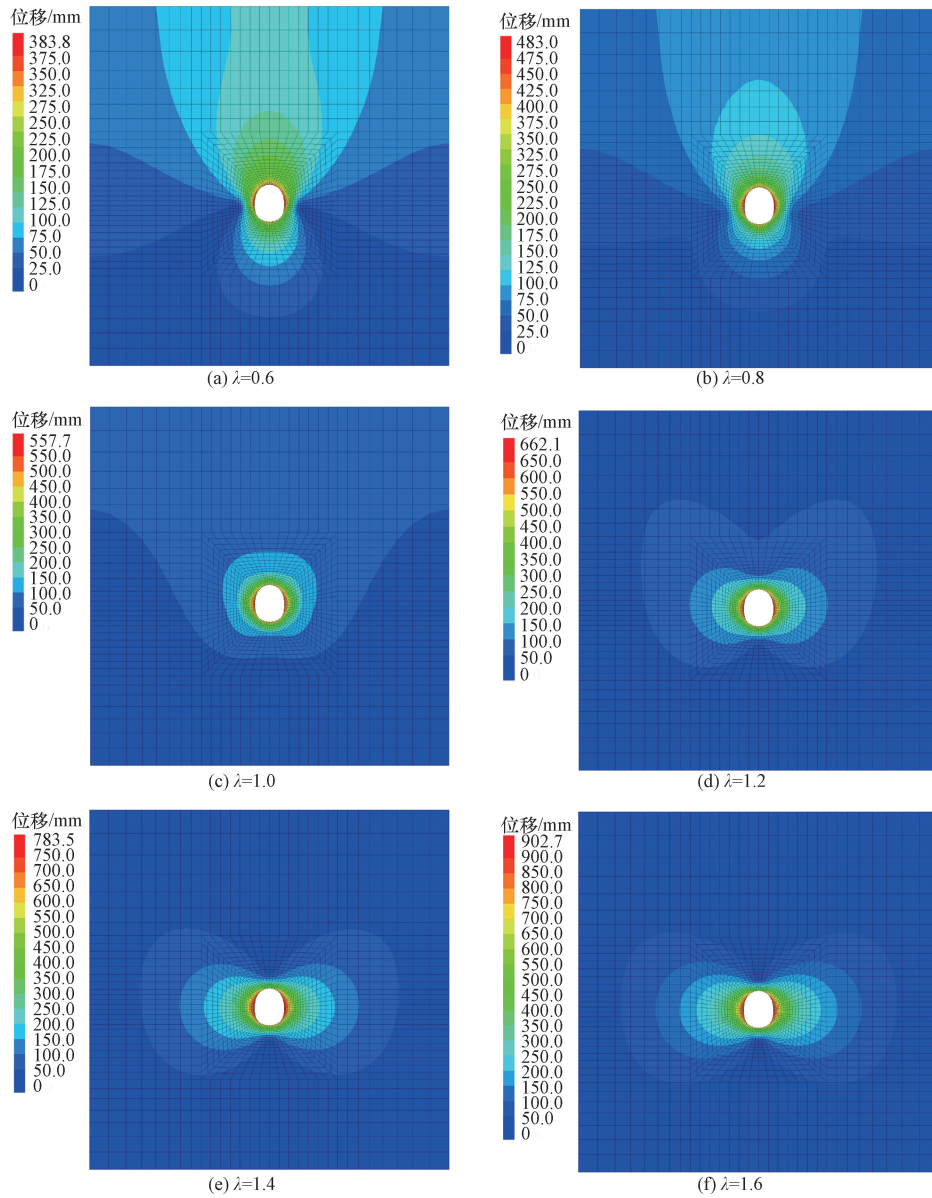


图6 不同侧压力系数下隧道围岩位移

Fig. 6 Displacement magnitude of tunnel surrounding rock under different lateral pressure coefficients

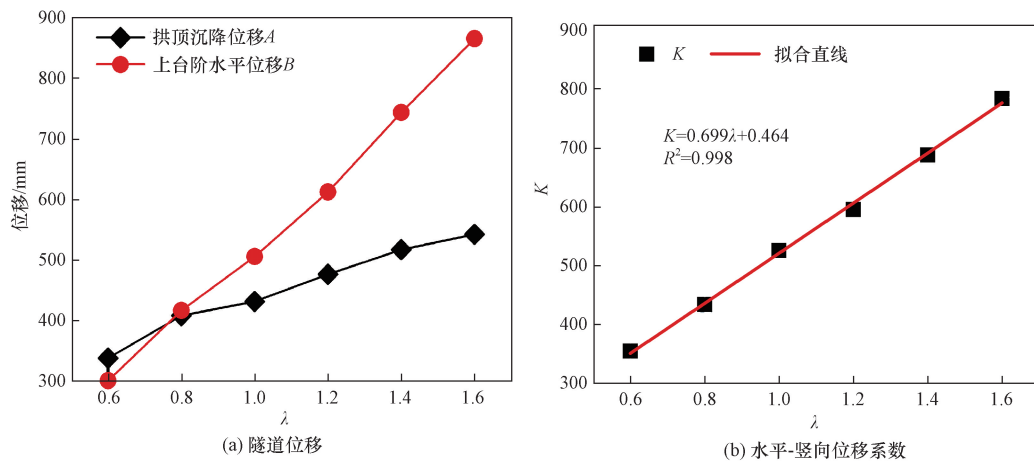


图7 侧压力系数与隧道变形的关系

Fig. 7 Relationship between lateral pressure coefficient and tunnel deformation

因此,隧道设计时,类椭圆断面的尺寸应满足轴比  $m = \lambda^{-1}$  或使轴比  $m$  趋近于  $\lambda^{-1}$ , 以便围岩更好地发挥自承能力。

为了解决宗思隧道的大变形问题,施工中不断对隧道断面参数进行优化。为此,先后对V级D型、V级加强型、大变形II型、大变形IIa型4种断面类型进行了现场试验,如图8所示。各型断面的  $m$  分别为 1.454、1.385、1.254、1.184,反演得到的  $\lambda$  的值为 1.1,  $\lambda^{-1}$  的值为 0.909。在试验过程中,隧道断面的轴比  $m$  逐步趋近于  $\lambda^{-1}$ , 如图9所示,不断提高了支护体系的承载能力。在现场试验过程中,辅之以其他控制措施,隧道变形破坏比例由V级D型断面的 77.9% 到V级加强型断面的 65.7%, 再到大变形II型断面的 18.4%, 最终降低到大变形IIa型断面的 0.8%, 如图10所示,基本解决了隧道大变形问题。

### 4 结论

为准确评估隧址区的侧压力系数,提出了一种结合监控量测数据与数值模拟的侧压力系数反演方法,为隧道设计与施工优化提供了新的思路。首先通过隧道现场监控数据获得边墙水平位移与拱顶竖向位移的比值,接着利用数值模拟建立水平-竖向位移系数与侧压力系数之间的函数关系,最终反演出隧址区的侧压力系数,并应用于隧道断面的优化。研究得出如下结论。

(1) 当支护阻力  $p_1$  相同时,隧道拱顶沉降位移  $D_v$  和边墙水平位移  $D_h$  都随侧压力系数  $\lambda$  的增大而增大;当侧压力系数  $\lambda$  相同时,隧道拱顶沉降位移  $D_v$  和边墙水平位移  $D_h$  都随支护阻力  $p_1$  的增大而减小;在相同的地质条件下,支护阻力  $p_1$  不影响侧压力

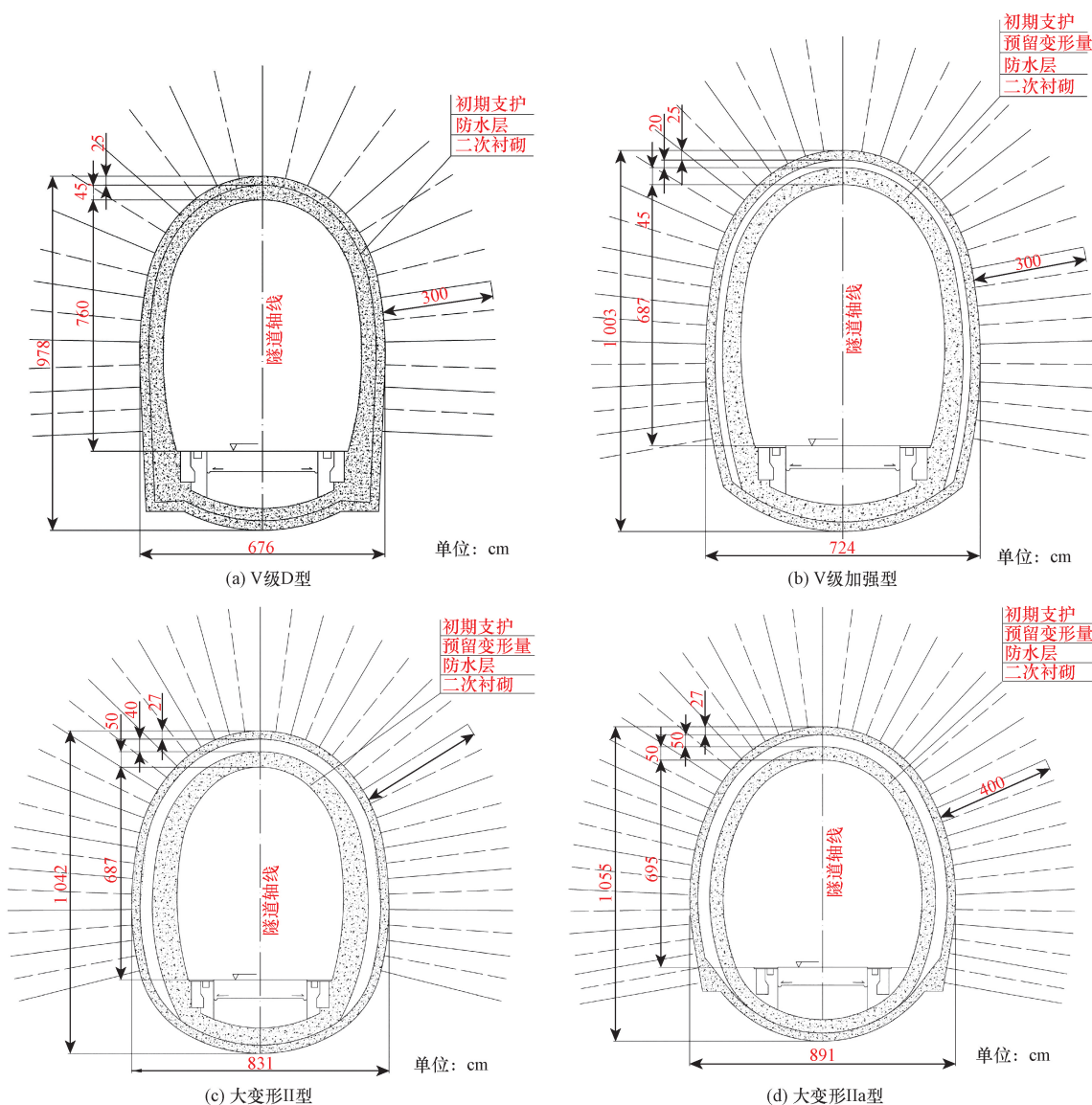


图8 隧道设计断面

Fig. 8 Cross-sectional parameters of the tunnel

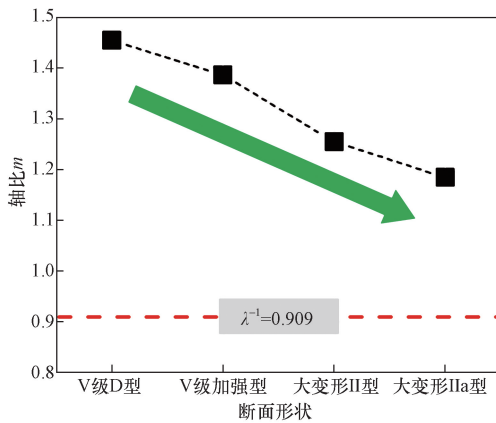


图9 隧道断面轴比的变化趋势

Fig. 9 Trend of tunnel section axis ratio

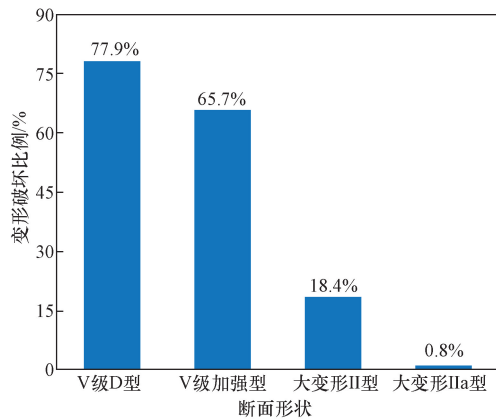


图10 隧道衬砌变形破坏比例

Fig. 10 Excessive deformation and damage of the lining

系数  $\lambda$  与水平-竖向位移系数  $K$  的关系, 水平-竖向位移系数  $K$  与侧压力系数  $\lambda$  近似呈线性关系。

(2) 无论隧道的埋深变化, 还是围岩条件变化, 隧道的水平位移始终与沉降位移存在比例关系; 由于上台阶水平位移测点和拱顶沉降位移测点同时安装, 而中台阶水平位移测点安装滞后, 上台阶水平位移与沉降位移的线性关系比中台阶更显著。

(3) 隧道设计时, 类椭圆断面的尺寸应满足轴比  $m = \lambda^{-1}$  或使轴比  $m$  趋近于  $\lambda^{-1}$ , 以便围岩更好地发挥自支撑能力; 反演得到隧道断面上侧压力系数为 1.1, 现场试验过程中, 隧道断面的轴比  $m$  由最初的 1.454 最终降低到 1.184, 逐步趋近于  $\lambda^{-1}$  的值 0.909, 不断提高了支护体系的承载能力, 使隧道变形破坏比例由最初的 77.9% 降低到 0.8%。

### 参 考 文 献

[1] 代聪, 何川, 陈子全, 等. 超大埋深特长公路隧道初始地应力场反演分析[J]. 中国公路学报, 2017, 30(10): 100-108.  
Dai Cong, He Chuan, Chen Ziquan, et al. Inverse analysis of initial ground stress field of deep embedded and extra long highway tunnel[J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30

(10): 100-108.  
[2] 李彬, 张文, 文冉. 陕南特长公路隧道水压致裂法地应力测量结果及工程地质意义分析[J]. 地质力学学报, 2022, 28(2): 191-202.  
Li Bin, Zhang Wen, Wen Ran. Study on the hydraulic fracturing *in-situ* stress measurement in super-long highway tunnels in southern Shaanxi; engineering geological significance[J]. Journal of Geomechanics, 2022, 28(2): 191-202.  
[3] 肖本职, 罗超文, 刘元坤. 鄂西地应力测量与隧道岩爆预测分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(24): 4472-4477.  
Xiao Benzhi, Luo Chaoyuan, Liu Yuankun. *In-situ* stress measurement and prediction analysis of tunnel rockburst in west Hubei[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(24): 4472-4477.  
[4] 纪杰, 刘泉声, 朱元广, 等. 三维地应力测试系统及其在深部软岩中的应用研究[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(16): 88-94.  
Ji Jie, Liu Quansheng, Zhu Yuanguang, et al. Three-dimensional test system of geostress and its practical research in deep soft rock [J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16(16): 88-94.  
[5] 侯明勋, 葛修润. 岩体初始地应力场分析方法研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(8): 1626-1630.  
Hou Mingxun, Ge Xiurun. Study on fitting analysis of initial stress field in rock masses[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(8): 1626-1630.  
[6] 周家文, 杨兴国, 吴震宇, 等. 浅埋岩体隧洞初始地应力场位移反分析方法研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2010, 42(1): 35-41.  
Zhou Jiawen, Yang Xingguo, Wu Zhenyu, et al. Displacement back analysis of initial stresses filed of shallow rock masses tunnel [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2010, 42(1): 35-41.  
[7] 朱伯芳. 岩体初始地应力反分析[J]. 水利学报, 1994(10): 30-35.  
Zhu Bofang. Back analysis of initial stresses in rock masses [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1994(10): 30-35.  
[8] 赵昶, 马秋峰. 基于弹塑性理论的软岩隧道最大变形量预测方法研究[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(4): 1719-1725.  
Zhao Yun, Ma Qiufeng. Prediction method of maximum deformation of soft rock tunnel based on elastoplastic theory[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(4): 1719-1725.  
[9] 郭小龙, 谭忠盛, 喻渝. 成兰铁路软岩隧道大变形控制技术及变形控制基准研究[J]. 铁道学报, 2022, 44(3): 86-104.  
Guo Xiaolong, Tan Zhongsheng, Yu Yu. Study on large deformation control technology and deformation control criteria for soft rock tunnels of Chengdu-Lanzhou railway[J]. Journal of China Railway Society, 2022, 44(3): 86-104.  
[10] Brown E T, Hoek E. Trends in relationships between measured *in-situ* stresses and depth [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1978, 15(4): 211-215.  
[11] Yang K, Yan Q, Zhang C, et al. Investigation of energy transformation and dissipation in soft rock tunnels with yielding support under large deformation [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2024, 57(8): 6119-6140.  
[12] 方超, 薛亚东, 葛嘉诚. 侧压力系数对高地应力隧道力学行

- 为的影响分析[J]. 公路隧道, 2012(2): 23-26.
- Fang Chao, Xue Yadong, Ge Jiacheng. Analysis of the influence of lateral pressure coefficient on mechanical behavior of high geostress tunnel[J]. Highway Tunnel, 2012(2): 23-26.
- [13] 林志斌, 杨大方, 李元海. 不同侧压力系数下圆形巷道变形破裂规律分析[J]. 安全与环境学报, 2017, 17(2): 457-462. Lin Zhibin, Yang Dafang, Li Yuanhai. Analysis of the regularity of the displacement and rupture in the circular roadway under different lateral pressure coefficients[J]. Journal of Safety and Environment, 2017, 17(2): 457-462.
- [14] 柳厚祥, 庞昌秀. 侧压力系数对节理岩体隧道稳定性的影响[J]. 交通科学与工程, 2021, 37(2): 28-35. Liu Houxiang, Pang Changxiu. Impact of lateral pressure coefficient on stability of tunnel in jointed rock mass[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2021, 37(2): 28-35.
- [15] 王振, 韩春, 王伦祥, 等. 侧压力系数对节理岩体隧洞位移动响模拟研究[J]. 水资源与水工程学报, 2013, 24(3): 26-29. Wang Zhen, Han Chun, Wang Lunxiang, et al. Simulation research on response of joint rock tunnel displacement under role of lateral pressure coefficient[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2013, 24(3): 26-29.
- [16] 李占海, 朱万成, 冯夏庭, 等. 侧压力系数对马蹄形隧道损伤破坏的影响研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(S2): 434-441, 461. Li Zhanhai, Zhu Wancheng, Feng Xiating, et al. Effect of lateral pressure coefficients on damage and failure process of horseshoe-shaped tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(S2): 434-441, 461.
- [17] 王士民, 申兴柱, 彭博, 等. 侧压力系数对盾构隧道管片衬砌受力及破坏形态的影响研究[J]. 铁道学报, 2019, 41(7): 102-109. Wang Shiming, Shen Xingzhu, Peng Bo, et al. Analysis of effect of lateral strata pressure coefficient on mechanical characteristics and failure modes of lining of shield tunnel segment lining of shield tunnel[J]. Journal of China Railway Society, 2019, 41(7): 102-109.
- [18] 王志杰, 袁晔, 何晟亚, 等. 侧压力系数对高地应力隧道二次衬砌承载力的影响[J]. 铁道建筑, 2015(3): 54-56. Wang Zhijie, Yuan hua, He Shengya, et al. Influence of lateral pressure coefficient on bearing capacity of secondary lining of tunnel in high ground-stress area[J]. Railway Engineering, 2015(3): 54-56.
- [19] 李鹏飞, 赵勇, 张顶立, 等. 基于现场实测数据统计的隧道围岩压力分布规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(7): 1392-1399. Li Pengfei, Zhao Yong, Zhang Dingli, et al. Study of distribution laws of tunnel surrounding rock pressure based on field measured data statistics[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(7): 1392-1399.
- [20] 华安增. 矿山岩石力学基础[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1980. Hua Anzeng. Fundamentals of mining rock mechanics [M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1980.
- [21] 国家铁路局. 铁路隧道设计规范: TB 10003—2016[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2016. National Railway Administration of the People's Republic of China. Code for design of railway tunnel: TB 10003—2016 [S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2016.
- [22] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015. Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of concrete structures: GB 50010—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015.