

# 深埋无中导洞连拱隧道过程荷载计算方法研究

张建<sup>1,2</sup>, 孙纬宇<sup>1,3</sup>, 严松宏<sup>1,3\*</sup>, 王永刚<sup>2</sup>, 王文<sup>2</sup>

(1. 兰州交通大学土木工程学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 甘肃省交通规划勘察设计院股份有限公司, 甘肃 兰州 730030;

3. 甘肃省道路桥梁与地下工程重点实验室, 甘肃 兰州 730070)

**摘要:** 无中导洞连拱隧道规避了传统连拱隧道施工工序繁杂、应力转换频繁等缺点, 近年来在我国取得了越来越广泛的应用, 而该新型结构的围岩压力计算方法并未有统一的标准可循。基于普氏理论及过程设计方法, 考虑先行洞支护结构对后行洞塌落拱高度的抑制作用及后行洞开挖对先行洞围岩压力的加剧影响, 建立了深埋无中导洞连拱隧道过程荷载计算方法, 最后通过与典型工程现场监控量测结果及参考文献计算方法比对分析。研究结果表明, 通过应力分布组合的方式确定先行洞支护结构支撑能力能够量化对后行洞围岩压力的抑制作用; 定量分析影响围岩压力的四个主要因素影响程度(围岩级别 S (32.66%)、先行洞开挖宽度 W<sub>1</sub> (28.02%)、后行洞开挖宽度 W<sub>2</sub> (22.34%)、先行洞支护强度 G (16.99%)), 使得后行洞开挖对先行洞围岩压力影响系数的取值更加合理。通过对深埋无中导洞连拱隧道过程荷载计算方法的求解, 能够为无中导洞连拱隧道支护结构提供较为科学合理的设计依据。

**关键词:** 连拱隧道; 普氏理论; 过程荷载; 最大隶属度原则

中图分类号: U451 文献标识码: A 文章编号:

作者简介: 张建(1987-), 男, 博士研究生, 主要从事地下工程支护结构设计方面的研究。E-mail: 16813698@qq.com.

## Calculation method of calculating rock pressure of deeply buried double-arch tunnel without middle drift

ZHANG Jian<sup>1,2</sup>, SUN Wei-yu<sup>1,3</sup>, YAN Song-hong<sup>1,3\*</sup>, WANG Yong-gang<sup>2</sup>, WANG Wen<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 2. Gansu Provincial Transportation Planning Survey and Design Institute Co., Ltd., Lanzhou 730030, China; 3. Key Laboratory of Road & Bridge and Underground Engineering of Gansu Province, Lanzhou 730070, China)

**Abstract:** The multi arch tunnel without a central guide tunnel avoids the drawbacks of traditional multi arch tunnel construction processes such as complexity and frequent stress conversion. In recent years, it has been widely used in China, but there is no unified standard for calculating the surrounding rock pressure of this new structure. Based on the Prussian theory and process design method, considering the inhibitory effect of the support structure of the advance tunnel on the collapse arch height of the subsequent tunnel and the intensifying effect of the excavation of the subsequent tunnel on the surrounding rock pressure of the advance tunnel, a process load calculation method for deep buried multi arch tunnels without a central guide tunnel was established. Finally, the rationality of the process load calculation method was verified by comparing and analyzing with the monitoring and measurement results of typical engineering sites and reference calculation methods. The research results indicate that determining the support capacity of the advance tunnel support structure through the combination of stress distribution can quantify the inhibitory effect on the surrounding rock pressure of the subsequent tunnel; Quantitative analysis of the four main factors that affect the degree of influence on surrounding rock pressure (rock level S (32.66%), excavation width W<sub>1</sub> (28.02%) of the front tunnel, excavation width W<sub>2</sub> (22.34%) of the rear tunnel, and support strength G (16.99%) of the front tunnel) makes the value of the coefficient of influence of rear tunnel excavation on the surrounding rock pressure of the front tunnel more reasonable. By solving the process load calculation method for deep buried multi arch tunnels without central guide tunnels, a more scientific and reasonable design basis can be provided for the support structure of multi arch tunnels without central guide tunnels.

**Key words:** multi-arch tunnel; Protodyakonov's theory; process load; principle of maximum affiliation

## 0 引言

自1974年连拱隧道在日本伊祖首次使用之后, 随着隧道建设的不断发展, 因其占地小、路线指标适应性好等优点, 连拱隧道采用率越来越高<sup>[1]</sup>。但由于传统的连拱隧道需要先通过中导洞施做中隔墙, 使得建设过程中存在施工工序复杂、工效低、多次应力转换致使衬砌结构病害较多等缺点<sup>[2-4]</sup>, 限制了连拱隧道的进一步发展。

近年来, 无中导洞施工的连拱隧道在云南等省份

得到了广泛应用。李志厚等<sup>[5]</sup>通过分析连拱隧道是否设置中导洞的施工方案对比, 印证了无中导洞施工的可行性。艾心荧<sup>[6]</sup>通过对CRD法施工的无中导洞连拱隧道竖向沉降进行现场监控量测, 揭示了由于洞室施工的叠加影响, 地表沉降更为显著。曾维成<sup>[7]</sup>在白龙

基金项目: 国家自然科学基金项目(52208392, 52068044, U2468217); 中国博士后科学基金项目(2021M693843); 甘肃省交通运输厅科技项目(2024-48)

收稿日期: 2021-05-11

\*通讯作者: 严松宏(E-mail: yansonghong@163.com)

坡隧道实施的现场监控量测结果验证了无中导洞施工方法的可行性，并指出后行洞存在偏压效应。江伟等<sup>[8]</sup>通过现场爆破振动跟踪监测结果，分析了后行洞开挖过程中先行洞边墙二衬的爆破振动响应特性并推荐了减隔震措施。张俊儒等<sup>[9]</sup>开展室内模型试验，结果显示中隔墙顶部围岩压力均大于拱顶处围岩压力。张皓<sup>[10]</sup>通过模型试验揭示无中导洞连拱隧道后行洞开挖后，先行洞监测断面的围岩压力整体增大。虽然目前已经对无中导洞连拱隧道做了大量工作，但其研究内容多为基于施工的可行性研究及其控制措施，加之在建或运营的工程实例较少，工程设计中还是存在一定的盲目性。尤其是深埋条件下无中导洞连拱隧道的荷载计算方法还未成熟，无中导洞连拱隧道的支护结构设计缺乏理论依据。

连拱隧道的围岩压力是确定隧道支护结构设计的基础。丁文其等<sup>[11]</sup>将普氏理论推广应用到连拱隧道的围岩压力计算方法中。李鸿博等<sup>[12]</sup>在此基础上推导了考虑中隔墙影响的深埋连拱隧道围岩压力计算公式，并给出了隧道深浅埋分界高度的确定原则，该计算方法作为公路行业推荐方法一直沿用至今。李鹏飞等<sup>[13]</sup>基于连拱隧道双塌落拱的基本假定，推导了非对称连拱隧道深埋情况下的围岩压力计算公式。但上述围岩压力的确定均基于隧道一次开挖的受力环境，未考虑施工过程中的动态变化。为此，XIE Caijin 等<sup>[14]</sup>通过模型试验和现场监控量测揭示了无中导洞连拱隧道施工过程中荷载分布变化特征。高红杰等<sup>[15]</sup>基于过程设计理念推导了深埋非对称连拱隧道过程荷载计算公式，并结合工程案例验证了该计算方法的准确度。TANG Hua 等<sup>[16]</sup>基于极限平衡分析，在考虑施工工序的基础上指出先行洞所承受的围岩压力较后行洞而言有所增大。姜成业等<sup>[17]</sup>考虑了先行洞既有支护结构对松散荷载的约束作用，提出了深埋无中导连拱隧道围岩压力计算方法，并结合工程案例进行了验证。

综上所述，基于一次开挖应力状态，连拱隧道的围岩压力计算方法已较为成熟，但无中导洞连拱隧道的实施过程中既有后行洞开挖对先行洞围岩压力的放大影响，又有先行洞支护结构对后行洞围岩荷载的抑制作用，传统的连拱隧道围岩压力确定方法并不能准确的描述无中导洞施工的连拱隧道围岩压力，在此基础上确定支护结构参数也不尽合理。

为此，本文在现行深埋连拱隧道围岩压力计算方法的基础上，运用过程设计方法，提出确定后行洞围岩压力时，应充分考虑先行洞衬砌结构支护能力对其抑制作用；通过考虑后行洞对先行洞围岩压力的主要影响因素影响程度的不同，引入影响系数来量化后行洞开挖对先行洞围岩压力的影响。根据上述先行洞和

后行洞之间的相互影响关系，确定极限承载拱引起的附加荷载，建立基于普氏理论的深埋无中导洞连拱隧道过程荷载计算方法，最后结合具体案例验证该计算方法的合理性和实用性。

## 1 现行深埋连拱隧道围岩压力计算方法

深埋连拱隧道围岩压力主要由基本松散压力、附加松散压力和中隔墙顶围岩压力三部分组成（见图1）。基本围岩压力为单侧隧道形成的稳定塌落拱下部松散岩体产生的围岩压力，一般按垂直均匀压力考虑；附加松散压力与中隔墙回填的及时性和密实度相关，在隧道影响范围内呈三角形分布，中隔墙顶围岩压力呈倒三角形分布。

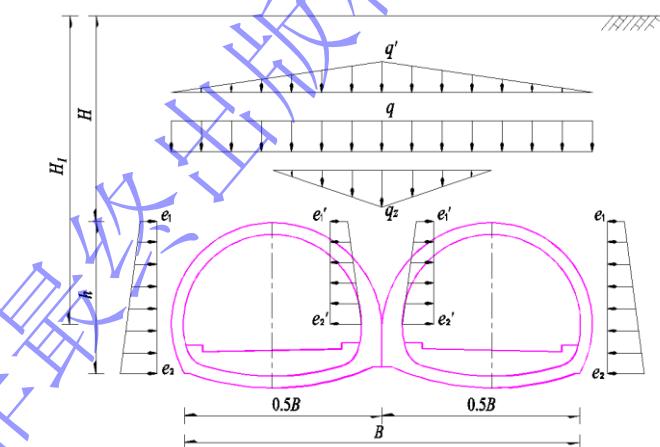


图1 深埋连拱隧道围岩压力分布示意图

Fig. 1 Load distribution of deep-buried multi-arch tunnels

### 1.1 垂直压力

$$q = \gamma h_1^h = 0.45 \times 2^{S-1} \gamma [1 + i_1(0.5B - 5)] , \quad (1)$$

$$q' = \xi \gamma \times 0.45 \times 2^{S-1} [B(i_2 - 0.5i_1) - 5(i_2 - i_1)] , \quad (2)$$

$$q_z = (H_1 - H)\gamma . \quad (3)$$

其中， $q$  为隧道基本垂直均布压力 ( $\text{kN}/\text{m}^2$ )； $q'$  为附加垂直围岩压力 ( $\text{kN}/\text{m}^2$ )； $q_z$  为两主洞之间三角区围岩自重荷载 ( $\text{kN}/\text{m}^2$ )； $\gamma$  为围岩重度 ( $\text{kN}/\text{m}^3$ )； $h_1^h$  为计算宽度为  $0.5B$  时的塌落拱高度 ( $\text{m}$ )； $i_1$ 、 $i_2$  分别为计算宽度采用  $0.5B$ 、 $B$  时的围岩压力增减率； $S$  为围岩级别； $\xi$  为附加荷载修正系数，中隔墙顶部三角区回填密实且与衬砌结构密贴时， $\xi$  取值为  $0.2\sim0.3$ ，反之  $\xi$  取值为  $0.6\sim0.7$ ，一般情况下  $\xi$  取值为  $0.3\sim0.6$ 。

### 1.2 远离中隔墙侧向压力

$$e_1 = \lambda \gamma h_1^h , \quad (4)$$

$$e_2 = \lambda \gamma (h_1^h + h) . \quad (5)$$

其中， $e_1$ 、 $e_2$  分别为远离中隔墙侧隧道顶部和底部的侧向压力 ( $\text{kN}/\text{m}^2$ )； $\lambda$  为水平侧压力系数； $h$  为隧道开挖高度 ( $\text{m}$ )。

### 1.3 中隔墙两侧作用于隧道衬砌上的水平侧向压力

$$e_1 = \lambda(q + q') , \quad (6)$$

$$e_2 = \lambda(q + q' + q_z) . \quad (7)$$

其中,  $e_1$ 、 $e_2$  分别为远离中隔墙侧隧道顶部和底部的侧向压力 ( $\text{kN}/\text{m}^2$ )。

## 2 基于过程设计方法围岩压力分析

过程设计方法<sup>[18]</sup>的就是基于隧道施工全过程, 充分考虑施工步序及支护结构, 逐步计算得到隧道不同阶段对应的围岩压力。同一部位不同施工阶段时的围岩压力不同, 是过程设计方法和状态设计方法最本质的区别。

### 2.1 先行洞衬砌结构对后行洞松动荷载的影响

传统的连拱隧道往往是先通过中导洞完成中隔墙, 当主洞开挖时, 中隔墙会及时为主洞衬砌结构提供一定的支护能力, 抑制极限塌落拱的规模。根据普氏理论, 连拱隧道在建设过程中可能存在以下两个极端情况:

情况一: 若两洞上覆岩土松散或先行洞衬砌结构支撑能力较弱产生过大的形变, 先行洞拱顶无法形成稳定的塌落拱, 其塌落拱宽度大于先行洞和后行洞宽度之和 (见图 2)。

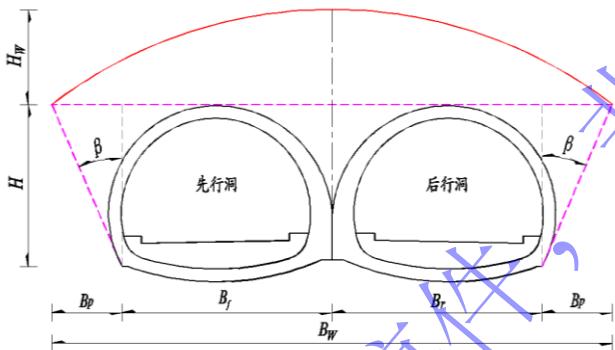


图 2 塌落拱曲线示意图 (情况一)

Fig. 2 Curves of load-bearing arch (First situations)

情况二: 若先行洞衬砌结构承载能力强、形变小, 先行洞和后行洞各自形成独立的塌落拱。(见图 3)。

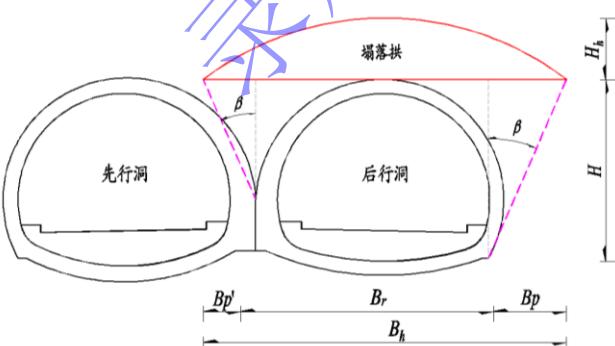


图 3 塌落拱曲线示意图 (情况二)

Fig. 3 Curves of load-bearing arch (Second situations)

无中墙连拱隧道施工过程中, 先行洞施工后会及

时施做对应的支护结构, 待后行洞开挖时, 先行洞衬砌结构已经具备了一定的支撑能力  $P_z$ , 先行洞衬砌结构分担了部分后行洞极限塌落拱所产生的围岩压力, 降低了后行洞塌落拱高度 (见图 4)。

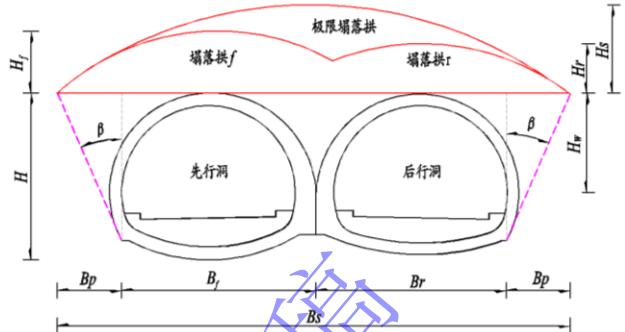


图 4 无中墙连拱隧道塌落拱曲线示意图

Fig. 4 Curves of load-bearing arch for double-arch tunnel without middle drift

香丽高速公路开达古隧道的病害形式及受力分析结果<sup>[19]</sup>表明, 在后行洞分部开挖影响下先行洞承载模式会发生显著变化: 先行洞靠近后行洞侧衬砌结构内力明显增加, 边墙部位因压应力过大易出现结构溃损现象。公路隧道衬砌结构一般按小偏心受压构件进行设计, 在衬砌结构横截面范围内的极限应力分布如图 5 所示, 为便于计算, 该受力模式可以等效为两种应力分布的组合 (见图 6)。

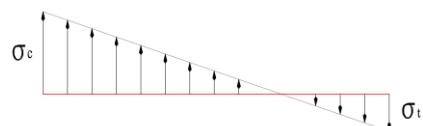


图 5 隧道横截面极限应力分布图

Fig. 5 Ultimate stress distribution diagram of tunnel cross-section

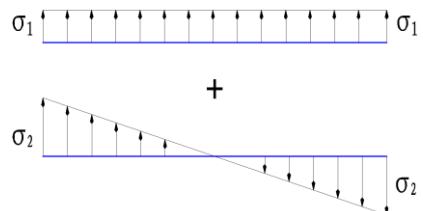


图 6 应力组合图

Fig. 6 Stress combination diagram

其平衡方程为:

$$\sigma_1 + \sigma_2 = \sigma_c , \quad (8)$$

$$\sigma_2 - \sigma_1 = \sigma_t . \quad (9)$$

其中,  $\sigma_c$ 、 $\sigma_t$  分别为衬砌结构的组合极限抗压强度和极限抗拉强度, 其值分别由式(10)、式(11)确定。

$$\sigma_c = (1 - \rho) \times \sigma_{cc} + \rho \times \sigma_{cg} , \quad (10)$$

$$\sigma_t = (1 - \rho) \times \sigma_{tc} + \rho \times \sigma_{tg} \quad . \quad (11)$$

其中,  $\rho$  为衬砌结构中的配筋率;  $\sigma_{tc}$  为衬砌结构混凝土极限抗压强度 (MPa);  $\sigma_{tg}$  为钢材极限抗压强度 (MPa);  $\sigma_{tc}$  为衬砌结构混凝土极限抗拉强度 (MPa);  $\sigma_{tg}$  为钢材极限抗拉强度 (MPa)。

衬砌结构横截面的轴力  $N$  和弯矩  $M$ :

$$N = \sigma_1 \times d \quad , \quad (12)$$

$$M = \int_0^{d/2} kx^2 dx = \frac{kd^3}{24} \quad . \quad (13)$$

其中,  $k = \frac{\sigma_2}{d/2}$ ,  $d$  为衬砌结构厚度 (m)。

后行洞开挖后洞室的结构稳定性主要有以下三个影响因素:

①先行洞靠近后行洞侧衬砌结构顶部岩土体的抗压能力  $P_s$ ;

$$P_s = R_s^B / K_s \quad . \quad (14)$$

其中,  $R_s^B$  为顶部岩土体的抗压强度 (MPa);  $K_s$  为先行洞衬砌对上部岩体的支撑能力安全系数, 一般取 2.

②传递至先行洞靠近后行洞侧衬砌结构上的荷载应小于附加荷载的总重量  $G_2$ :

$$G_2 = \frac{2}{3} \gamma H_s B_s - \frac{2}{3} \gamma H_f (B_f + B_p) - \frac{2}{3} \gamma H_r (B_r + B_p) \quad . \quad (15)$$

其中,  $H_s$  为连拱隧道极限塌落拱高度 (m);  $B_s$  为连拱隧道极限塌落拱总跨度 (m);  $H_f$  为先行洞单独开挖引起的塌落拱高度 (m);  $H_r$  为后行洞单独开挖引起的塌落拱高度 (m);  $B_f$  为先行洞开挖跨度 (m);  $B_r$  为后行洞开挖跨度 (m);  $B_p$  为连拱隧道侧边围岩破裂面在水平面上的投影宽度 (m), 可按下式计算:

$$B_p = (H - H_0) \tan\left(45^\circ - \frac{\varphi_c}{2}\right) \quad . \quad (16)$$

其中,  $H$  隧道开挖高度 (m);  $H_0$  为隧道基础至破裂面起始点的高度 (m);  $\varphi_c$  为围岩计算摩擦角 ( $^\circ$ )。

③先行洞靠近后行洞侧衬砌结构的支撑能力  $P_z$ .

$$P_z = \frac{N}{B_r} = \frac{\sigma_1 \times d}{B_r} \quad . \quad (17)$$

隧道结构整体稳定性的控制因素是上述三个影响因素中的最小值:

$$q_z = \min\left(\frac{P_s}{K_z}, P_z, \frac{G_2}{d}\right) \quad . \quad (18)$$

综上所述, 考虑先行洞衬砌结构对后行洞的影响

时, 后行洞对应的塌落拱高度  $H'_h$  为:

$$H'_h = \frac{B_p + B_r + B'_p}{2f_{kp}} + \frac{q_z}{\gamma} \quad . \quad (19)$$

其中,  $f_{kp}$  为围岩坚固性系数;  $B'$  为后行洞靠先行洞侧边围岩破裂面在水平面上的投影宽度 (m),  $B'_p = H_w \times \tan\left(45^\circ - \frac{\varphi_c}{2}\right)$ ;  $H_w$  为两隧道结构分叉处至主洞开挖轮廓顶部之间的距离 (m)。

## 2.2 后行洞施工扰动对先行洞支护结构所承受的松散荷载的影响

引入影响系数  $\eta$ <sup>[14]</sup> 来反应后行洞施工扰动对先行洞支护结构所承受的松散荷载的影响。由工程经验可知, 其值不应小于 1.0, 当取 1.0 时表示该导洞荷载分布不受其他导洞的影响。

决定影响系数  $\eta$  取值的因素有很多, 其主要影响因素为先行洞开挖宽度  $W_1$ 、后行洞开挖宽度  $W_2$ 、先行洞支护强度  $G$  及围岩级别  $S$ 。为更加准确的描述各因素对影响系数  $\eta$  的影响程度, 在正交试验的基础上采用模糊分析方法对多目标综合评价隶属度进行分析。表 1 为 4 个主要影响因素正交试验因素水平表 L16 (4<sup>4</sup>)。

表 1 正交试验因素水平  
Table 1 Orthogonal test factor level

水平	因素		
	先行洞宽度 $W_1/m$	后行洞宽度 $W_2/m$	支护强度 $G$
1	4	4	14
2	10.5	10.5	22
3	14	14	30
4	18	18	38

其中,  $W_1$  和  $W_2$  分别取目前国内公路系统常见的单车道、两车道、三车道和四车道对应的开挖宽度; 以先行洞衬砌结构厚度与对应等效刚度的乘积表示先行洞支护强度  $G$ ; 围岩级别根据现行公路隧道设计规范中的要求进行取值。

采用先行洞所承受的围岩压力作为后行洞开挖对先行洞的影响评判指标, 运用 Midas GTS/NX 建立二维有限元数值模型, 模拟 16 种工况下后行洞开挖先行洞特定位置处的围岩压力。模型 Y 方向高 120m, 隧道最小埋深 46m, 下边界距开挖面底部为 53m; X 方向宽 120m, 隧道开挖面距左右边界最小距离 42m。模型底面为固定约束, 上表面为自由边界, 两侧均为水平位移约束, 荷载仅考虑自重作用。由于本次计算仅为了对比围岩压力变化趋势, 故对模型进行了适当简化。地层采用弹性模型, 支护结构采用梁单元模拟, 先后行洞开挖均采用全断面开挖法。

计算结果见表 2。

表 2 不同参数指标计算结果

Table 2 Calculation results of different parameter indicators

编号	W <sub>1</sub>	W <sub>2</sub>	G	S	围岩压力/kPa		
					A	B	C
1	4	4	14	II及以上	30	34	39
2	4	10.5	22	III	49	57	65
3	4	14	30	IV	133	138	148
4	4	18	38	V	259	243	167
5	10.5	4	22	IV	170	207	170
6	10.5	10.5	14	V	265	362	383
7	10.5	14	38	II及以上	75	122	114
8	10.5	18	30	III	146	186	162
9	14	4	30	V	97	184	184
10	14	10.5	38	IV	217	281	265
11	14	14	14	III	138	186	194
12	14	18	22	II及以上	117	184	201
13	18	4	38	III	122	138	138
14	18	10.5	30	II及以上	101	134	151
15	18	14	22	V	362	459	454
16	18	18	14	IV	350	488	456

备注: A、B、C 分别代表先行洞远离后行洞侧拱部 45° 处、拱顶、靠近后行洞侧拱部 45° 处的围岩压力。

分别取先行洞远离后行洞侧拱部 45° 处、拱顶、靠近后行洞侧拱部 45° 处的围岩压力进行极差分析, 极差越大、该因素对相应指标的影响程度越重。

基于评价指标远离后行洞侧的围岩压力图(见图 7), 围岩级别的极差为 164.88, 是 4 个因素中最大的, 故围岩级别 S 对远离后行洞侧的均值围岩荷载影响程度最高, 其次为 W<sub>1</sub>、W<sub>2</sub> 及 G。而评价指标为望小型指标, 则基于评价指标先行洞远离后行洞侧的均值围岩压力的最优方案为: W<sub>1</sub>=4m、W<sub>2</sub>=4m、G=30 及围岩等级为 II 级及以上。

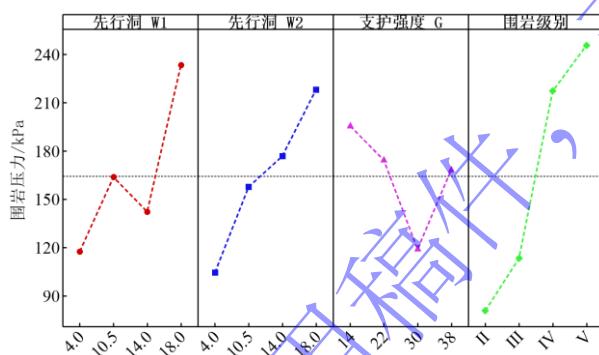


图 7 基于远离后行洞侧的均值围岩压力图

Fig 7 The average surrounding rock pressure map based on the side away from the back tunnel

基于评价指标先行洞拱顶的均值围岩压力图(见图 8), 4 个因素中 S 的极差最大, 为 193.30, 故围岩级别对先行洞拱顶的均值围岩压力影响程度最高, 其次为 W<sub>1</sub>、W<sub>2</sub> 及 G。同样, 评价指标为望小型指标, 则基于评价指标先行洞拱顶的均值围岩压力的最优方案为 W<sub>1</sub>=4m、W<sub>2</sub>=4m、G=30 及围岩级别为 II 级及以上。

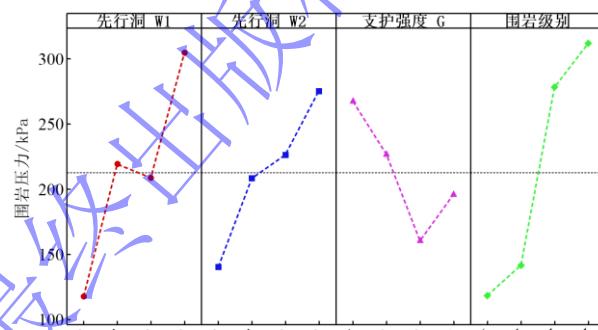


图 8 基于拱顶的均值围岩压力图

Fig. 8 Mean surrounding rock pressure map based on arch crown

基于评价指标靠近后行洞侧的均值围岩压力图(见图 9), 4 个因素中 W<sub>1</sub> 的极差最大, 为 194.70, 故 W<sub>1</sub> 对靠近后行洞侧的均值围岩荷载影响程度最高, 其次为 S、W<sub>2</sub> 及 G。同样, 评价指标为望小型指标, 则基于评价指标先行洞靠近后行洞侧的均值围岩压力的最优方案为 W<sub>1</sub>=4m、W<sub>2</sub>=4m、G=30 及围岩级别为 II 级及以上。

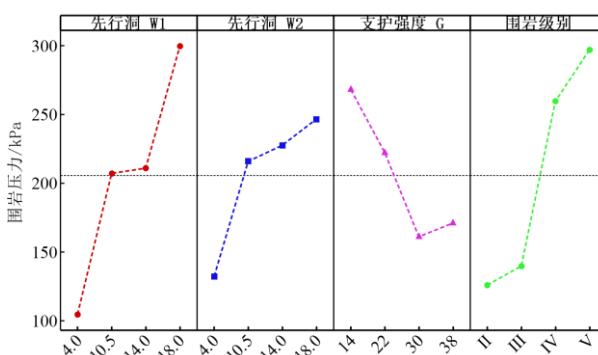


图 9 基于靠近后行洞侧的均值围岩压力图

Fig. 9 Mean surrounding rock pressure map based on the proximity to the side of the rear tunnel

上述 3 个评价指标的最优水平因素组合汇总后得表 3。

表 3 不同评价指标下的参数组合

Table3 Parameter combination under different evaluation indexes

评价指标	先行洞宽度	后行洞宽度	先行洞强度	级别
围岩压力	W <sub>1</sub> /m	W <sub>2</sub> /m	G	S
远离后行洞侧	4	4	30	II
拱顶	4	4	30	II
靠近后行洞侧	4	4	30	II

为进一步定性分析各主要影响因素对评价指标的影响程度, 利用模糊综合评价方法对其隶属度进行排序。由于本次计算的围岩压力数值越小对工程越有利, 为偏小型隶属度函数, 采用(半)梯形函数。

$$f_{ik} = \begin{cases} 1, & y_k^i \leq \min_{1-16}(y_k) \\ \frac{\max_{1-16}(y_k) - y_k^i}{\max_{1-16}(y_k) - \min_{1-16}(y_k)}, & \min_{1-16}(y_k) < y_k^i < \max_{1-16}(y_k), \\ 0, & y_k^i \geq \max_{1-16}(y_k) \end{cases}, \quad (20)$$

式中:  $k=1,2,3$ , 对应三个评判指标;  $i=1, \dots, 16$ , 为正交试验内的试验总数;  $y_k^i$  为正交试验中第  $i$  次试验中的  $y_k$  取值;  $\min_{1-16}(y_k)$  为所有 16 次试验中第  $k$  个评判指标所对应结果中的最小值;  $\max_{1-16}(y_k)$  为所有 16 次试验中第  $k$  个评判指标所对应结果中的最大值。

构建评价指标的模糊关系矩阵:

$$G = (f_{ik})_{16 \times 3}, \quad (21)$$

经一致性检验后, 确定判定矩阵为:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 2 \\ 1/3 & 1 & 1/2 \\ 1/2 & 2 & 1 \end{bmatrix}, \quad (22)$$

归一化处理后, 得 3 个指标的权重向量:

$$\omega = [0.54 \quad 0.16 \quad 0.30]^T, \quad (23)$$

隶属度为:

$$t = G \times \omega, \quad (24)$$

各正交试验组综合评价指标隶属度见表 4。

表 4 各正交试验组合综合指标隶属度值

Table4 Membership values of comprehensive indexes of orthogonal test combinations

i	t <sub>i</sub>	i	t <sub>i</sub>
1	1.00000	9	0.733641
2	0.942932	10	0.445285
3	0.717740	11	0.659088
4	0.460210	12	0.688402
5	0.617492	13	0.743288
6	0.254949	14	0.769501
7	0.840825	15	0.011858
8	0.668967	16	0.019525

对各隶属度  $t_i$  做极差分析, 见表 5。结果表明, 对综合评价的影响程度从大到小依次是: 围岩级别 S (32.66%)、先行洞开挖宽度 W<sub>1</sub> (28.02%)、后行洞开挖宽度 W<sub>2</sub> (22.34%)、先行洞支护强度 G (16.99%)。

表 5 模糊综合评价水平因素隶属度极差分析

Table5 Analysis of membership degree range of horizontal factors in fuzzy comprehensive evaluation

水平	W1	W2	G	围岩级别
1	0.7802	0.7736	0.4834	0.8247
2	0.5956	0.6032	0.5652	0.7536
3	0.6316	0.5574	0.7225	0.4500
4	0.3860	0.4593	0.6224	0.3652
极差	0.3942	0.3143	0.2391	0.4595
占比/%	28.02	22.34	16.99	32.66

影响系数  $\eta$  的取值为:

$$\eta = \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \alpha_4, \quad (25)$$

其中,  $\alpha_1 \sim \alpha_4$  为各影响因素的量化取值。

综合考虑各影响因素的影响程度, 建议  $\alpha_1 \sim \alpha_4$  的取值见表 6。

表 6 各项影响指标的取值

Table6 Values of various impact indicators

W <sub>1</sub> /m	$\alpha_1$	W <sub>2</sub> /m	$\alpha_2$	G	$\alpha_3$	围岩等级	$\alpha_4$
4	0.80	4	0.90	14	1.15	II 及以上	0.8
10.5	1.05	10.5	1.00	22	1.10	III	0.9
14	1.15	14	1.10	30	1.00	IV	1.1
18	1.25	18	1.20	38	0.90	V	1.3

### 3 深埋无中导洞连拱隧道过程荷载计算方法

#### 3.1 塌落拱分布模式

相较于传统连拱隧道实施方案, 无中墙连拱隧道更易产生极限塌落拱, 所对应的塌落拱分布模式如图 10 所示。

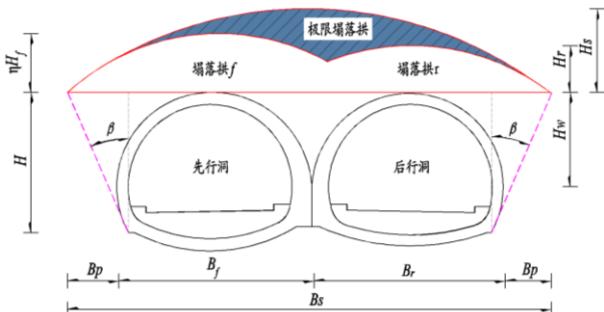


图 10 深埋无中墙连拱隧道塌落拱示意图

Fig. 10 Schematic diagram of load-bearing arch of deep-buried double arch tunnel without middle drift

#### 3.2 基本假定

基于上述塌落拱分布模式, 可做以下基本假定:

- 假定考虑了后行洞施工对先行洞影响的先行洞基本松散压力  $q_f$  分布模式为均匀分布。
- 假定考虑了先行洞衬砌结构对后行洞影响的后行洞基本松散压力  $q_r$  分布模式为均匀分布。
- 附加松散压力可由极限塌落拱范围和各主洞塌落拱范围做布尔运算得到, 可假定为三角形分布, 最大值  $q_a$  位于两主洞中部, 两侧开挖轮廓线处对应的数值分别为  $q_{af}$  和  $q_{ar}$ 。
- 两主洞之间三角区的松散围岩压力  $q_z$  为倒三

角分布。

5) 作用于两主洞之间及主洞两侧的水平侧向压力为直角梯形分布。

围岩压力分布模式如图 11 所示:

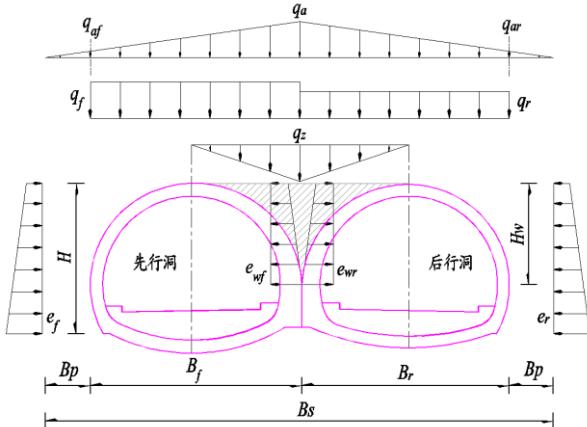


图 11 深埋无中洞连拱隧道围岩压力分布示意图

Fig 11 Schematic diagram of surrounding rock load distribution model

### 3.3 围岩压力计算公式推导

#### (1) 基本松散压力

先行洞对应的塌落拱高度:

$$H_f = \frac{B_f + 2H \tan \beta}{2f_{kp}} , \quad (26)$$

后行洞对应的塌落拱高度:

$$H_r = \frac{B_p + B_r + B'_p - q_z}{2f_{kp}} - \frac{q_z}{\gamma} , \quad (27)$$

极限塌落拱高度:

$$H_s = \frac{B_s}{2f_{kp}} = \frac{B_f + B_r + 2H \tan \beta}{2f_{kp}} , \quad (28)$$

考虑后行洞施工影响的先行洞基本松散压力:

$$q_f = \eta H_f \gamma , \quad (29)$$

考虑先行洞既有衬砌结构对后行洞影响的后行洞基本松散压力:

$$q_r = H_r \gamma , \quad (30)$$

#### (2) 附加松散压力

极限塌落拱边界线近似为抛物线, 则塌落拱曲线边界与跨度水平线所组成的闭合区域面积可表示为:

$$S = \frac{2}{3} B_s H_s , \quad (31)$$

该闭合区域内松散荷载为基本松散荷载及附加松散荷载的总和:

$$\frac{2}{3} B_s H_s \gamma = \frac{B_s q_a}{2} + (\eta B_f H_f + B_r H_r) \gamma , \quad (32)$$

由式(32)得:

$$q_a = \frac{4}{3} H_s \gamma - \frac{2(\eta B_f H_f + B_r H_r) \gamma}{B_s} , \quad (33)$$

同时, 由几何关系得:

$$q_a = (H_s - \eta H_f) \gamma , \quad (34)$$

$$q_{af} = \frac{B_p q_a}{B_p + B_f} , \quad (35)$$

$$q_{ar} = \frac{B_p q_a}{B_p + B_r} , \quad (36)$$

式(33)和式(34)为  $q_a$  的两种取值方法, 根据先行洞靠两洞侧的松散荷载不应大于极限塌落拱所对应的围岩压力这一前置条件, 得:

$$q_a = \min \left[ \frac{4}{3} H_s \gamma - \frac{2(\eta B_f H_f + B_r H_r) \gamma}{B_s}, (H_s - \eta H_f) \gamma \right] , \quad (37)$$

同理, 将两洞之间三角区松散荷载简化为:

$$q_z = \gamma H_w , \quad (38)$$

#### (3) 侧向水平压力

两主洞外侧侧向水平压力:

$$e_f^i = \lambda (q_f + q_{af} + \gamma H_f^i) , \quad (39)$$

$$e_r^i = \lambda (q_r + q_{ar} + \gamma H_r^i) , \quad (40)$$

两主洞中夹三角区侧侧向水平压力:

$$e_{wf}^i = \lambda (q_f + q_a + q_z^i) , \quad (41)$$

$$e_{wr}^i = \lambda (q_r + q_a + q_z^i) , \quad (42)$$

其中,  $e_f^i$  为先行洞侧向水平压力 (kPa);  $H_f^i$  为计算点处到先行洞拱顶之间的垂直距离 (m);  $e_r^i$  为后行洞侧向水平压力 (kPa);  $H_r^i$  为计算点处到后行洞拱顶之间的垂直距离 (m);  $e_{wf}^i$  为两主洞间三角区先行洞侧向水平压力 (kPa);  $e_{wr}^i$  为两主洞间三角区后行洞侧向水平压力 (kPa);  $q_z^i$  为三角区内计算点处对应的侧向水平压力 (kPa)。

## 4 工程实例对比分析

以云南省勐醒至江城至绿春 SJ1 标段曼腊隧道<sup>[17]</sup>现场监控量测工作为依据, 验证本文计算方法的准确性。

### 4.1 工程概况及测点布置

该隧道为无中导洞连拱隧道, 洞身主要为砂岩, 围岩等级为 V 级, 监测断面桩号为 K45+193, 对应隧道路埋深 74 m。测点分别布设在先行洞和后行洞外侧拱腰、内外侧拱肩及拱顶, 具体施工方案和测点布置如图 12 所示。

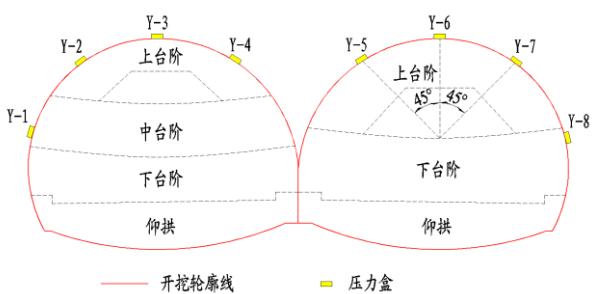


图 12 现场测点布置及开挖方案

Fig.12 Measuring point arrangement and excavation plan

## 4.2 结果对比分析

按照文献[17]中相关工程描述,先行洞开挖跨度 $B_f$ 为12.4 m,后行洞开挖跨度 $B_r$ 为11.9 m,洞室计算有效高度 $H$ 为9.4 m,搭接点到拱顶的垂直距离 $H_w$ 为5.1 m。本文计算方法结果与文献[17]计算方法、现场实测数据进行对比,如图13所示。

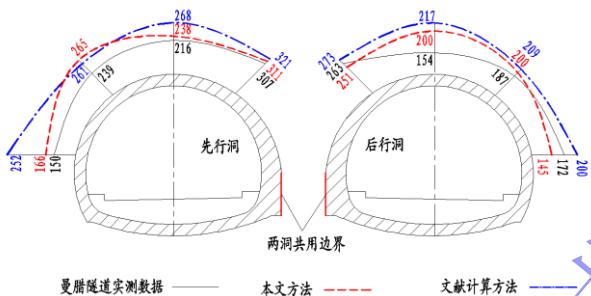


图 13 曼腊隧道现场监测值和计算值对比

Fig. 13 Comparison of on-site monitoring and calculated values of Man-La Tunnel

由图13可见,对先行洞所承受的围岩压力而言,本文计算方法所得结果与文献[17]中的计算方法数值相当,整体水平更接近现场监控量测结果;对于后行洞所承受的围岩压力而言,本文计算方法所得结果较文献[17]中的计算方法数值有所减少,究其原因为本文计算方法考虑了先行洞衬砌结构对于后行洞塌落拱规模的抑制作用,减少了后行洞所承受的围岩压力,其计算结果更接近现场监控量测结果。

## 5 结 论

(1) 基于过程设计方法,综合考虑无中导洞连拱隧道先行洞和后行洞之间的相互影响,建立了深埋无中导洞连拱隧道过程荷载计算方法。且其理论解与已有文献实测结果基本相当,验证了该计算方法的合理性。

(2) 根据隧道衬砌结构受力特性,采用应力分布组合的方式确定了先行洞衬砌结构的支撑能力,进而量化了既有支护结构对后行洞塌落拱高度的抑制作用。

(3) 利用正交试验建立了先行洞三个部位的围岩压力分析模型,通过模糊数学理论求得不同水平因素多评价指标的隶属度值,进而明确了各影响指标的取值范围,最终确定了后行洞开挖对先行洞围岩压力的影响系数。

(4) 本文计算方法与已有文献计算方法相比,后行洞所承受的围岩压力较文献计算方法有所减少,但更接近现场实测结果,证明考虑先行洞衬砌结构的支撑能力对后行洞的影响更符合深埋无中导洞连拱隧道实际围岩压力分布情况。

## 参 考 文 献:

- [1] 申玉生. 软弱围岩双连拱隧道设计施工关键技术研究[D]. 西南交通大学, 2005. (SHEN Yu-sheng. Research on the key technology for design and construction of the double-arch tunnel in the soft surrounding rock [D]. Southwest Jiaotong University, 2005. (in Chinese))
- [2] 刘庭金, 朱合华. 偏压连拱隧道病害分析及治理措施[J]. 中国公路学报, 2005, 18(4): 72 – 77. (LIU Ting-jin, ZHU He-hua. Research on defects of arcade tunnel with partial pressure and its treating measurements[J]. China Journal of Highway and Transport, 2005,18(4): 72 – 77. (in Chinese))
- [3] 刘庭金, 朱合华, 夏才初, 等. 云南省连拱隧道衬砌开裂和渗漏水调查结果及分析[J]. 中国公路学报, 2004,17(2): 64 – 67. (LIU Ting-jin, ZHU He-hua, XIA Cai-chu, et al. Analysis of site investigation of cracking and leakage on arcade tunnel lining of Yunnan province [J]. China Journal of Highway and Transport, 2004, 17(2): 64 – 67. (in Chinese))
- [4] 闵博. 非对称连拱隧道衬砌开裂特征及其对结构承载能力的影响研究[D]. 北京交通大学, 2021. (MIN Bo. Research on Cracking Characteristics of Asymmetric Multi-arch Tunnel Lining and Its Influence on Structural Bearing Capacity [D]. Beijing Jiaotong University, 2021 . (in Chinese))
- [5] 李志厚, 全跃, 陈树汪, 等. 浅埋软弱地层中连拱隧道有无中导洞施工工法对比研究[J]. 现代隧道技术, 2022,59(增1):59-73.(LI Zhi-hou, TONG Yue, CHEN Shu-wang, et al. Comparative Study on Central Drift Excavation Method and Single-tunnel Excavation Method Applied in Multi-arch Tunnel in Shallow-buried Soft Ground[J]. Modern Tunnelling Technology, 2022 .59( S1).59-73. (in Chinese))
- [6] 艾心英. 城市无中隔墙连拱隧道暗挖施工对地表建筑物的影响研究[D]. 武汉大学, 2013. (AI Xin-ying. Effect of Subsurface-Excavation Construction of City Double-arch

- Tunnel without Middle-Wall on Surface Buildings[D]. Wuhan University, 2013. (in Chinese))
- [7] 曾维成, 周应新, 翟俊莅, 等. 连拱隧道无中导洞施工技术与监测分析[J]. 地下空间与工程学报, 2019, 15(增刊 1): 361 – 366. (ZENG Wei-cheng, ZHOU Ying-xin, ZHAI Jun-li, et al. Construction technology without middle drift and monitoring analysis of double-arch tunnel [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2019, 15(Suppl 1): 361 – 366. (in Chinese) )
- [8] 江伟, 高启栋, 王亚琼, 等. 无中墙连拱隧道先行洞爆破振动响应特性与隔振方案比选研究[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(11): 2367 – 2377. (JIANG Wei, GAO Qi-dong, WANG Ya-qiong, et al. Blast vibration characteristics and its isolation scheme selection of existing tunnels in multi-arch tunnels without middle wall [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, 45(11): 2367 – 2377. (in Chinese) )
- [9] 张俊儒, 孙克国, 卢锋, 等. 不等跨连拱铁路隧道围岩压力分布及受力特征模型试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(11): 3077-3084. (ZHANG Jun-ru, SUN Ke-guo, LU Feng, et al. Model test study of surrounding rock pressure distribution and mechanical characteristics of unequal-span double-arch railway tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(11): 3077-3084. (in Chinese) )
- [10] 张皓. 无中导洞连拱隧道施工稳定性及工法优化研究[D]. 重庆交通大学, 2024. (Zhang Hao. Research on construction stability and construction method optimization of continuous arch tunnel without pilot tunnel[D]. Chongqing Jiaotong University, 2024. (in Chinese))
- [11] 丁文其, 王晓形, 朱合华, 等. 连拱隧道设计荷载的确定方法[J]. 中国公路学报, 2007, 20(5): 78–82.(DING wen-Qi, WANG Xiao-xing, ZHU He-hua, et al. Defining method for designing load of multi-arch tunnel[J]. China Journal of Highway and Transport, 2007, 20(5): 78–82. (in Chinese) )
- [12] 李鸿博, 郭小红. 公路连拱隧道土压力荷载的计算方法研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(11): 3430–3434.(LI Hong-bo, GUO Xiao-hong. Research on calculation methods of earth pressure on multi-arch tunnel for highway [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(11): 3430–3434. (in Chinese) )
- [13] 李鹏飞, 王帆, 聂雄, 等. 深埋非对称连拱隧道围岩压力计算方法研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(9): 1625–1629.(LI Peng-fei, WANG Fan, NIE Xiong, et al. Methods for calculating rock pressure of symmetrical multi-arch deep tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(9): 1625–1629. (in Chinese) )
- [14] Xie, C., Tao, T. & Rao, J. Time-varying response analysis of surrounding rock construction mechanics of a double-arch tunnel without a middle pilot tunnel and suggestions for tunnel construction. Lithosphere 2022, 6306861. <https://doi.org/10.2113/2022/6306861> (2022).
- [15] 高红杰, 何平, 陈峥. 深埋非对称连拱隧道过程荷载计算方法研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(6): 1059–1066.(GAO Hong-jie, HE Ping, CHEN Zheng. Calculation of process load of deep-buried asymmetric multi-arch tunnels [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(6): 1059–1066. (in Chinese) )
- [16] TANG Hua, JIANG Cheng-ye, DENG Qin, et al. Calculation of pressure on the shallow-buried double-arch tunnel without middle drift[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2022, 26(11): 4805–4814.
- [17] 姜成业, 汤华, 邓琴, 等. 深埋无中导洞连拱隧道围岩压力计算方法研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2023, 54(3):1168–1177.(JIANG Cheng-ye, TANG Hua, DENG Qin, et al. Calculation method of surrounding rock pressure of deeply buried doublearch tunnel without middle drift[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2023, 54(3): 1168–1177. (in Chinese) )
- [18] 曲海峰. 扁平特大断面公路隧道荷载模式及应用研究[D]. 同济大学,2007.(QU Hai-feng. Study on Load Mode of Road Tunnel with Extra-large Cross-section and Low Flat- ratio and Its Application[D]. Tongji University,2007. (in Chinese) )
- [19] 龚方浩. 无中导洞直中墙连拱隧道衬砌裂损原因分析及整治研究 [D]. 中南大学,2022.(GONG Fang-hao. Cause analysis and treatment of lining cracks of straight-middle-wall and multi-arch tunnel without middle drift [D]. Central South University,2022. (in Chinese) )