

DOI: 10.11779/CJGE201609009

# 深埋非对称连拱隧道围岩压力计算方法研究

李鹏飞<sup>1,2</sup>, 王帆<sup>1,2</sup>, 聂雄<sup>3</sup>, 张成平<sup>\*3</sup>

(1. 北京工业大学城市与工程安全减灾教育部重点实验室, 北京 100124; 2. 北京城市交通协同创新中心, 北京 100124;  
3. 北京交通大学城市地下工程教育部重点实验室, 北京 100044)

**摘要:** 非对称连拱隧道具有几何与结构形式不对称、开挖跨度大、施工工序繁多、结构受力复杂等力学特性, 在进行支护结构设计中通常需要进行荷载-结构模型验算, 而其荷载确定尚无成熟的计算方法。在此背景下, 考虑了左右两洞室几何与结构形式不对称条件, 基于连拱隧道双塌落拱的基本假定, 根据普氏理论推导了深埋情况的围岩压力计算公式。将推导公式取对称条件, 则可以退化为常规连拱隧道的计算公式, 验证了所推导公式的正确性。最后结合工程实例, 验证了所推导公式的合理性。研究方法和结论可以为非对称连拱隧道的设计荷载确定提供重要参考。

**关键词:** 连拱隧道; 围岩压力; 非对称; 普氏理论

中图分类号: TU432; U45 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2016)09-1625-05

**作者简介:** 李鹏飞(1983-), 男, 河南开封人, 副教授, 主要从事隧道与城市地下工程方面的教学与研究。E-mail: lpf@bjut.edu.cn。

## Methods for calculating rock pressure of symmetrical multi-arch deep tunnels

LI Peng-fei<sup>1,2</sup>, WANG Fan<sup>1,2</sup>, NIE Xiong<sup>3</sup>, ZHANG Cheng-ping<sup>3</sup>

(1. Key Lab of Urban Security and Disaster Engineering, Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;  
2. Beijing Collaborative Innovation Center for Metropolitan Transportation, Beijing 100124, China; 3. Key Laboratory for Urban Underground Engineering of the Ministry of Education, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract:** The mechanical characteristics of asymmetrical multi-arch tunnels are as follows: a symmetric geometry and structure form, large excavation span, various construction processes and complex structural stress. Therefore in the design of supporting structures, the load-structure model is usually used, and till now there aren't any mature methods for estimating the load. In this context, the conditions of asymmetric geometry and structure form of two cavities of a tunnel are considered. Based on the assumption of the double collapsed arches of multi-arch tunnels and according to the Protodyakonov's theory, a formula for calculating the rock pressure under deep buried conditions is derived. Under symmetrical conditions, the derived formula becomes the conventional formula for multi-arch tunnels, which has proved the validity of the derived formula. The research methods and conclusions may provide an important reference for the determination of the design load of asymmetrical multi-arch tunnels.

**Key words:** multi-arch tunnel; rock pressure; non-symmetrization; Protodyakonov's theory

## 0 引言

改革开放以来, 随着国民经济的飞速发展, 城市化进程不断推进和西部大开发战略决策得以成功实施, 中国城市道路网和城市间的高速公路网正在形成, 城市地下道路工程和穿山越岭的隧道工程不断涌现。小间距隧道凭借其结构型式的灵活性和新颖性, 被城市公路隧道所广泛采用, 然而鉴于公路线位和地形条件的限制, 一些隧道不得不采用连拱结构形式, 而非对称连拱隧道更是特殊条件下的一种特殊结构形式<sup>[1]</sup>。非对称连拱隧道除具有结构受力复杂, 施工工序繁多和防排水难度大等连拱隧道一般特点外, 还具有几何不

对称、结构不对称和左右荷载不对称等复杂的力学特性, 而且其跨度较大、开挖与支护交错进行, 使得围岩应力变化和支护荷载转换变得更加复杂。

非对称连拱隧道作为一种极为复杂的结构型式, 虽然数量还不多, 但已引起学术界极大的关注。周玉宏等<sup>[2]</sup>、郑宗溪等<sup>[3]</sup>、王凯等<sup>[4]</sup>、邓建等<sup>[5]</sup>分别采用连续介质模型对云南元磨高速公路桥头隧道, 兰渝铁路

基金项目: 国家科技支撑计划课题项目(2012BAJ01B03); 北京市自然科学基金项目(3144026)

收稿日期: 2015-04-22

\*通讯作者(E-mail: chpzhang@bjtu.edu.cn)

新作坊隧道, 青岛胶州湾海底隧道分岔段和某高速公路不等跨连拱隧道的施工过程进行了数值模拟, 获得了偏压条件下连拱隧道不同开挖顺序时围岩及支护结构在各个施工阶段的力学响应。胡学兵等<sup>[6]</sup>、关则廉<sup>[7]</sup>和高峰等<sup>[8]</sup>则分别采用荷载-结构模型对重庆市渝中连接隧道, 广州地铁三号线番禺折返线工程大跨度不对称连拱隧道和厦门市东坪山地下立交工程非对称连拱隧道的支护结构受力特性进行了计算分析。刘涛等<sup>[9]</sup>对偏压连拱隧道围岩的稳定性进行了数值模拟和模型试验, 研究了偏压连拱隧道的塑性区分布, 以及偏压对隧道拱部、边墙、中墙力学行为的影响; 王军等<sup>[10-14]</sup>研究了非对称连拱隧道的围岩稳定性, 指出了围岩和支护结构变形及受力特征, 总结了其施工技术。然而这些研究主要集中在偏压连拱隧道施工工序优化方面, 而偏压条件下连拱隧道非对称支护结构的设计方法研究较少。

围岩压力作用模式和计算方法作为隧道围岩与支护结构作用关系的核心内容, 直接关系到衬砌结构型式的选取和支护参数的确定, 一直是隧道学术界研究的热点问题。丁文其等<sup>[15]</sup>在规范单洞隧道荷载计算公式的基础上, 提出了基于双塌落拱理论的连拱隧道荷载计算公式, 开创了连拱隧道围岩压力计算方法的先河, 但该方法不足之处是无法全面地考虑中隔墙的预支撑作用。在此基础上, 李鸿博等<sup>[16]</sup>推导了基于普氏平衡拱理论且考虑中隔墙预支撑作用的连拱隧道围岩压力计算公式, 并通过大量数据计算分析和现场监测数据验证了该公式的正确性和可行性。然而这些研究成果主要是针对对称连拱隧道, 无法直接应用到非对称的情况。

本文考虑了非对称连拱隧道的偏压效应, 推导了围岩压力的计算方法, 供非对称连拱隧道支护结构设计参考。

## 1 单洞隧道普氏理论

普氏理论是俄国学者普罗托奇雅阔诺夫<sup>[17]</sup> (Протогьяконов) 于1907年提出的针对松散地层和破碎岩体的松动压力计算公式 (图1):

$$P = \gamma h_1 \quad (1)$$

$$h_1 = \frac{a_1}{f} = \frac{a + h \tan(45^\circ - \varphi_g/2)}{f} \quad (2)$$

水平压力计算公式为

$$e_i = r(h_1 + l) \tan^2(45^\circ - \varphi_g/2) \quad (3)$$

式中  $a$  为开挖跨度的一半;  $h$  为开挖跨度的高度;  $h_1$  为自然拱高度;  $\gamma$  为围岩重度;  $l$  为隧道侧壁任意点至隧道拱顶的垂直距离;  $\varphi_g$  为围岩计算摩擦角;  $f$  为岩

石坚固性系数, 根据公路、铁路隧道设计规范中, 岩石坚硬强度对应的岩石单轴饱和抗压强度  $RC$  的数值, 取  $f = 0.1RC$ 。

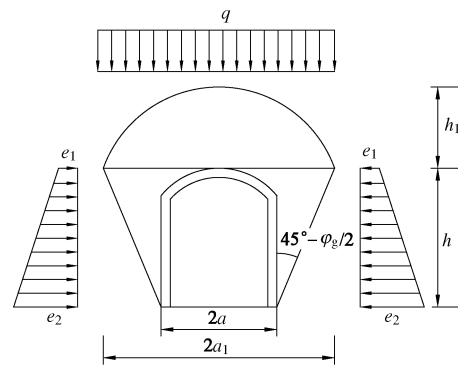


图1 普氏理论示意图

Fig. 1 Sketch map of protodyakonov's theory

## 2 深埋非对称连拱隧道围岩压力计算

### 2.1 围岩压力作用模式

连拱隧道施工中一般采用中导洞先行开挖且中隔墙施工完成后再开挖两侧导洞的施工步序, 因此, 中隔墙的稳定性和对其顶部岩土体的主动支护压力作用<sup>[16]</sup>直接影响了连拱隧道围岩压力的作用模式。对于深埋情况, 根据普氏理论可以认为中隔墙的非常稳定和非常不稳定是连拱隧道承载拱形成的两个极端情形。当中隔墙非常稳定时, 两侧的洞室就可以分别形成独立的承载拱, 连拱隧道围岩压力可以简化为两个单侧承载拱下部不稳定土体引起的松散压力, 如图2所示; 而当中隔墙非常不稳定或中隔墙顶部回填不密实, 围岩变形过大, 左右两个洞室将连成一个整体形成共同的承载拱, 即不考虑中隔墙的支护作用, 以整个连拱隧道开挖宽度形成一个大的极限承载拱 (见图2), 此时连拱隧道围岩压力可以简化为该极限承载拱下方不稳定土体引起的松散压力。

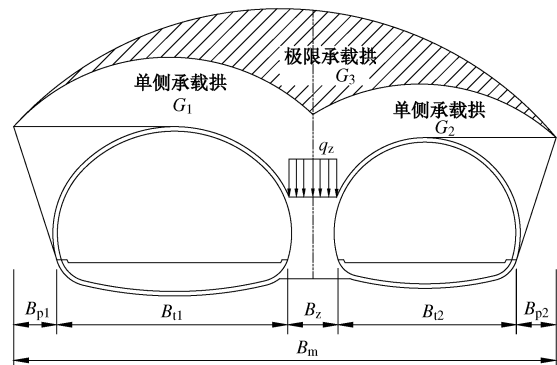


图2 深埋非对称连拱隧道承载拱曲线

Fig. 2 Curves of load-bearing arch for deep buried asymmetric multi-arch tunnels

根据以上分析可知, 深埋连拱隧道围岩压力作用模式通常介于两种极限情况之间, 即中隔墙的主动承

载作用分担了极限承载拱内的松散压力, 抑制了极限承载拱的形成, 因此连拱隧道围岩压力可以看作拱部松散压力和中隔墙顶部压力之和, 可以简化为以下 4 部分<sup>[16]</sup>, 如图 3 所示。

(1) 中隔墙顶均布荷载  $q_z$ , 即由于中隔墙的预支撑作用产生土压力荷载。

(2) 基本松散土压力  $q_1$ , 即由单侧洞室形成稳定承载拱下部的土压力, 可以假定其分布形式为左右不等的均布荷载。

(3) 附加松散土压力荷载  $q_2$ , 即左右洞室共同形成的极限承载下部松散土体减去基本松散土体及中隔墙顶预支撑土压力荷载后的荷载, 可以假定为梯形分布荷载。

(4) 中隔墙顶松散土压力荷载  $q_3$ , 即左右洞拱顶至中隔墙顶之间松散土体形成的分布荷载。

(5) 非对称连拱隧道水平荷载可以分解为作用在衬砌两侧及中隔墙两侧的围岩压力。

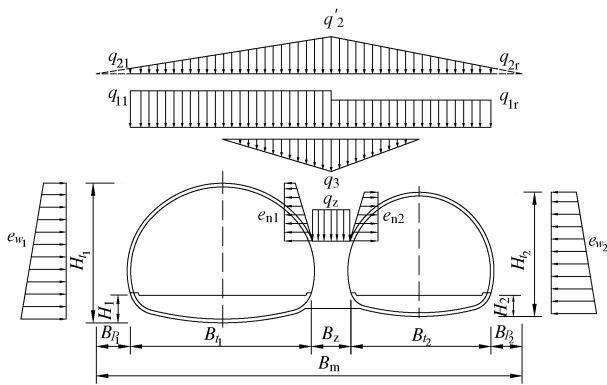


图 3 深埋非对称连拱隧道围岩压力分布

Fig. 3 Distribution of rock pressures of deep buried asymmetric multi-arch tunnels

### 2.2 计算基本假定

假定图 2 中连拱隧道单侧承载拱曲线和极限承载拱曲线均为抛物线, 因此该承载拱曲线与隧道拱顶水平线围成的区域面积  $S$  可以根据承载拱跨度  $B$  和承载拱拱高  $H$  计算得到, 即  $S=2BH/3$ 。

基本松散土压力  $q_1$  可以看作由单侧洞室形成稳定承载拱下部的岩土体重量产生, 根据左右洞室的平衡拱高度分别求得。

为简化分析, 根据普氏理论, 假定左右洞室的平衡拱高度  $H_{q1}$  和  $H_{q2}$ , 以及极限承载拱高度  $H_u$  分别为

$$H_{q1} = \frac{1}{2} \left( B_{l1} + B_{p1} + \frac{1}{2} B_z \right) / f \quad (4)$$

$$H_{q2} = \frac{1}{2} \left( B_{r2} + B_{p2} + \frac{1}{2} B_z \right) / f \quad (5)$$

$$H_u = \frac{1}{2} B_m / f \quad (6)$$

其中:  $B_m = B_{l1} + B_{l2} + B_z + B_{p1} + B_{p2}$ ;  $B_{p1} = (H_{l1} - H_1)$

$\tan \left( 45^\circ - \frac{\varphi_g}{2} \right)$ ;  $B_{p2} = (H_{r2} - H_2) \tan \left( 45^\circ - \frac{\varphi_g}{2} \right)$ ;  $B_{l1}$  为左侧隧道跨度;  $B_{r2}$  为右侧隧道跨度;  $B_z$  为中隔墙宽度;  $H_{l1}$  为左侧隧道高度;  $H_{r2}$  为右侧隧道高度;  $H_1$  为左侧隧道基础至破裂面起始点的高度;  $H_2$  为右侧隧道基础至破裂面起始点的高度; 其它符号及意义同前。

### 2.3 计算公式推导

(1) 中隔墙均布土压力荷载  $q_z$

中隔墙顶部的均布压力  $q_z$  主要取决于中隔墙顶岩土体的抗压能力  $p_s$  和极限承载拱内的附加总重量  $G_3$ , 即  $q_z = \min(p_s, G_3 / B_z)$ ,  $B_z$  为中隔墙能够发挥支撑作用有效宽度<sup>[16]</sup>。中隔墙顶岩土体的抗压能力  $p_s$  可通过下式求得

$$p_s = R_s^B / K_z \quad (7)$$

式中  $R_s^B$  为中隔墙顶岩体的设计抗压强度;  $K_z$  为中隔墙对上部岩体支撑能力的安全系数, 一般取 2。

极限承载拱内附加总重量  $G_3$  则可以表示如下:

$$G_3 = \frac{2}{3} \gamma B_m H_m - \frac{2}{3} \gamma B_{q1} H_{q1} - \frac{2}{3} \gamma B_{q2} H_{q2} \quad (8)$$

式中,  $B_{q1} = B_{l1} + B_{p1} + \frac{1}{2} B_z$ ,  $B_{q2} = B_{r2} + B_{p2} + \frac{1}{2} B_z$ 。

(2) 基本松散压力  $q_1$

将连拱隧道左、右洞基本松散压力均简化为均布荷载  $q_{1l}$  和  $q_{1r}$ , 可以表示如下:

$$q_{1l} = \gamma H_{q1} \quad (9)$$

$$q_{1r} = \gamma H_{q2} \quad (10)$$

(3) 附加松散土压力荷载  $q_2$

假设  $q_2$  在拱顶平面上呈三角形分布, 且向上的支撑压力与承载拱内的土体重量平衡, 则可得到

$$\frac{2}{3} \gamma (B_{q1} H_{q1} + B_{q2} H_{q2}) + \frac{B_m q'_2}{2} + q_z B_z = \frac{2 \gamma B_m H_m}{3} \quad (11)$$

$$\frac{q_{2l}}{q'_2} = \frac{B_{p1}}{B_m / 2} \quad (12)$$

$$\frac{q_{2r}}{q'_2} = \frac{B_{p2}}{B_m / 2} \quad (13)$$

由上式可以得到  $q'_2$ ,  $q_{2l}$ ,  $q_{2r}$  的计算公式如下

$$q_{2l} = \frac{B_{p1}}{B_m / 2} \cdot q'_2 \quad (14)$$

$$q_{2r} = \frac{B_{p2}}{B_m / 2} \cdot q'_2 \quad (15)$$

$$q'_2 = 2(G_3 - q_z B_z) / B_m \quad (16)$$

(4) 中隔墙顶松散土压力荷载  $q_3$

中隔墙顶分布土压力荷载  $q_3$  可简化为三角形荷载:

$$q_3 = \gamma H_{q3} \quad (17)$$

表1 深埋4车道连拱隧道围岩压力计算

Table 1 Calculation of rock pressures of deep buried multi-arch tunnels with 4 lines

围岩 分级	计算摩擦 角/(°)	重度 /(kN·m <sup>-3</sup> )	文献[16]计算结果				本文计算结果					
			q <sub>1</sub> /kPa	q <sub>2</sub> /kPa	q <sub>2</sub> <sup>i</sup> /kPa	q <sub>z</sub> /kPa	q <sub>11</sub> /kPa	q <sub>1r</sub> /kPa	q <sub>21</sub> /kPa	q <sub>2r</sub> /kPa	q <sub>2</sub> <sup>i</sup> /kPa	q <sub>z</sub> /kPa
IV级	51	21	130	22	114	600	130	130	22	22	114	600
V级	45	20	158	38	172	400	158	158	38	38	172	400

式中,  $H_{q_3}$  可以近似取为单侧大断面隧道拱顶距中隔墙顶的距离。

### (5) 水平围岩压力

根据本文计算基本假定, 作用在连拱隧道支护结构外侧的水平围岩压力  $e_{w1}^i = k(q_{11} + q_2^i + \gamma h_i)$ ,  $e_{w2}^i = k(q_{1r} + q_2^i + \gamma h_i)$ , 其中  $k$  为侧压力系数, 按朗肯公式计算,  $k = \tan^2\left(45^\circ - \frac{1}{2}\varphi\right)$ , 式中  $\varphi$  为围岩内摩擦角;

$q_2^i$  为衬砌外侧拱部及边墙计算点对应的附加松散土压力荷载;  $h_i$  为计算点到拱顶外侧的距离。

作用在连拱隧道支护结构内侧拱部水平方向土压力荷载  $e_{n1}^i = k(q_{11} + q_2^i + q_3^i)$ ,  $e_{n2}^i = k(q_{1r} + q_2^i + q_3^i)$ , 式中  $q_3^i$  为衬砌外侧拱部及边墙计算点对应的中隔墙顶松散土压力荷载。

## 3 公式验证与计算分析

### 3.1 公式验证

当连拱隧道左右对称时, 本文推导的计算公式将退化为文献[16]关于对称连拱隧道围岩压力的计算方法。因此可以采用本文方法和文献[16]的方法分别计算深埋4车道对称连拱隧道IV级、V级围岩条件下的围岩压力, 以验证本文推导公式的正确性。计算取连拱隧道单洞开挖跨度为11.5 m, 开挖高度为8.5 m, 中隔墙有效宽度为1.5 m, 计算结果如表1所示。根据计算结果可以看出, 采用本文方法得到的计算结果与文献[16]的计算结果非常吻合, 验证了本文推导公式的正确性。本文所推导的方法考虑了左右两侧洞几何与结构形式不对称对围岩压力分布的影响, 具有更广的适用性。

### 3.2 工程实例分析

由于非对称连拱隧道工程实例较少, 有围岩压力监测数据的实例则更少。首先, 当深埋连拱隧道左右几何对称时, 本文推导公式将退化为文献[16]的计算方法, 而该文已经通过监测实例验证了计算结果的正确性与合理性。

其次, 以文献[10]中马宅顶隧道为工程实例, 选取K56+215非对称连拱隧道结构断面, 按本文推导公式进行围岩压力计算, 并与实测初期支护与围岩间接接触压力作对比。该断面所处围岩为V级, 埋深约为50 m, 左洞开挖跨度11.5 m, 左洞开挖高度为8.5 m, 右

洞开挖跨度14 m, 右洞开挖高度为9 m, 中隔墙宽度为3 m, 计算摩擦角取45°, 重度取20 kN/m<sup>3</sup>。

根据本文推导公式可以求得该监测断面的围岩压力。将以上计算结果沿连拱隧道开挖轮廓线进行叠加, 得到计算围岩压力沿洞周的分布, 并与现场监测数据进行对比, 如图4所示。可以看出, 除左洞左拱脚测点外, 其余测点围岩压力计算结果要略大于现场实测结果, 即计算结果很好的包络了实测结果, 且两种数据均表现出中隔墙处围岩压力明显大于相邻拱肩处。考虑到直墙支护形式易产生拱脚处的应力集中, 且现场监测数据受诸多因素的影响, 监测结果多是相对于量测开始时的应力变化, 并非结构实际受力状态。

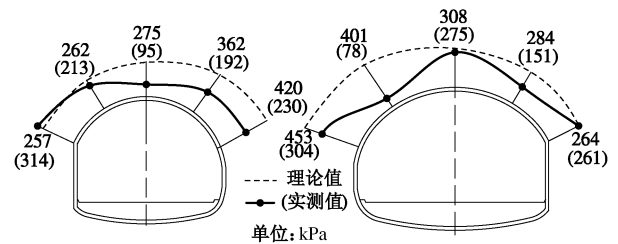


图4 马宅顶隧道围岩压力计算与实测结果对比

Fig. 4 Comparison between calculated and observed rock pressures of Mazhaiding tunnel

## 4 结 语

基于普氏平衡拱理论和连拱隧道双塌落拱的基本假定, 推导了深埋非对称连拱隧道的围岩压力计算公式。通过取对称条件下的公式计算, 验证了本文推导公式的正确性, 且本文推导公式考虑了连拱隧道的非对称形式, 具有更广的适用性, 最后结合工程实例验证了本文为非对称连拱隧道设计荷载计算提供参考。

### 参考文献:

- [1] 陈秋南. 非对称连拱隧道动态施工力学模拟研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2005. (CHEN Qiu-nan. Study on observation construction mechanics simulation for non-symmetry arch tunnel in highway[D]. Chongqing: Chongqing University, 2005. (in Chinese))
- [2] 周玉宏, 赵燕明, 程崇国. 偏压连拱隧道施工过程的优化研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(5): 679 - 683. (ZHOU Yu-hong, ZHAO Yan-ming, CHENG Chong-guo. Optimum analysis on the construction process for joint arch

- tunnels in partial pressure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, **21**(5): 679 - 683. (in Chinese))
- [3] 郑宗溪, 孙其清. 不对称双连拱偏压铁路隧道修建技术研究[J]. 铁道工程学报, 2012(8): 60 - 65. (ZHEN Zong-xi, SUN Qi-qing. Research on construction technology for unsymmetrical multi-arch and unsymmetrically loaded railway tunnel[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2012(8): 62 - 65. (in Chinese))
- [4] 王凯, 张成平, 王梦恕. 胶州湾海底隧道不对称双连拱断面施工优化分析[J]. 中国工程科学, 2012, **14**(1): 90 - 97. (WANG Kai, ZHANG Cheng-ping, WANG Meng-shu. Research on construction optimization of asymmetric double-arch section in Jiaozhou Bay Subsea Tunnel[J]. Engineering Sciences, 2012, **14**(1): 90 - 97. (in Chinese))
- [5] 邓建, 朱合华, 丁文其. 不等跨连拱隧道施工全过程的有限元模拟[J]. 岩土力学, 2004, **25**(3): 476 - 478. (DENG Jian, ZHU He-hua, DING Wen-qi. Finite element simulation of whole excavation operation of a unequal-span double-arch tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, **25**(3): 476 - 478. (in Chinese))
- [6] 胡学兵, 肖博, 吴胜忠. 非对称连拱隧道设计技术研究[J]. 公路交通技术, 2013(3): 91 - 96. (HU Xue-bing, XIAO Bo, WU Sheng-zhong. Research on design techniques for asymmetrical double-arch tunnels[J]. Technology of Highway and Transport, 2013, **2**(3): 91 - 96. (in Chinese))
- [7] 关则廉. 大跨度不对称双联拱隧道的设计与施工[J]. 西部探矿工程, 2005(9): 119 - 122. (GUAN Ze-lian. Large span asymmetric double arch tunnel design and construction[J]. West-China Exploration Engineering, 2005(9): 119 - 122. (in Chinese))
- [8] 高峰, 周谊一, 胡学兵. 厦门市东坪山地下立交工程非对称连拱隧道结构计算分析[J]. 公路交通技术, 2013(1): 102 - 105. (GAO Feng, ZHOU Yi-yi, HU Xue-bing. Structural computational and analysis for asymmetrical double-arch tunnel structures in underground interchange project in Dongpingshan of Xiamen[J]. Technology of Highway and Transport, 2013(1): 102 - 105. (in Chinese))
- [9] 刘涛, 沈明荣, 袁勇. 偏压连拱隧道围岩稳定性模型试验与数值分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2008, **36**(4): 460 - 465. (LIU Tao, SHEN Ming-rong, YUAN Yong. Model test and 3D numerical simulation study on wall rock mass stability of double-arch tunnel subject to partial press[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2008, **36**(4): 460 - 465. (in Chinese))
- [10] 王军, 夏才初, 朱合华, 等. 不对称连拱隧道现场监测与分析研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, **23**(2): 267 - 271. (WANG Jun, XIA Cai-chu, ZHU He-hua, et al. Site monitoring and analysis of non-symmetrical multi-arch highway tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, **23**(2): 267 - 271. (in Chinese))
- [11] 王亚琼, 张少兵, 谢永利, 等. 浅埋偏压连拱隧道非对称支护结构受力性状分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, **29**(增刊 1): 3265 - 3272. (WANG Ya-qiong, ZHANG Shao-bing, XIE Yong-li, et al. Mechanical characteristics of unsymmetrical support structure of shallow-buried bias multi-arch tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, **29**(S1): 3265 - 3272. (in Chinese))
- [12] 王凯, 张成平, 王梦恕. 不对称双连拱海底隧道施工引起的地层变形分析[J]. 岩土力学, 2011, **32**(9): 2771 - 2777. (WANG Kai, ZHANG Cheng-ping, WANG Meng-shu. Asymmetric double-arch subsea tunneling-induced ground deformation analysis[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(9): 2771 - 2777. (in Chinese))
- [13] 张科军, 石雪峰, 李海峰. 大跨度不对称双联拱隧道在复杂地质条件下的施工技术[J]. 铁道标准设计, 2007(增刊 2): 90 - 92. (ZHANG Ke-jun, SHI Xue-feng, LI Hai-feng. Large span asymmetric double arch tunnel construction technology under complex geological conditions[J]. Railway Standard Design, 2007(S2): 90 - 92. (in Chinese))
- [14] 马立志, 姚永勤. 北京地铁十号线不对称双联拱隧道浅埋暗挖施工技术[J]. 铁道标准设计, 2008(12): 171 - 173. (MA Li-zhong, YAO Yong-qin. The asymmetric double arch tunnel shallow tunnel construction technology of Beijing subway line 10[J]. Railway Standard Design, 2008(12): 171 - 173. (in Chinese))
- [15] 丁文其, 王晓彤, 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 Qi-wen, WANG Xiao-xing, ZHU He-hua, et al. Defining method for designing load of multi 2 arch tunnel[J]. China Journal of Highway and Transport, 2007, **20**(5): 78 - 82. (in Chinese))
- [16] 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))
- [17] 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 Peng-fei, ZHOU Ye, WU Dong. Calculation methods of surrounding rock pressure and application scope[J]. China Railway Science, 2013, **34**(6): 55 - 60. (in Chinese))