

偏压连拱隧道结构荷载计算及监测分析*

李辉¹, 刘可¹, 宋战平¹, 师伯泰²

(1. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 西安 710055; 2. 中铁九局集团有限公司, 沈阳 110013)

摘要: 依托工程实例, 基于双塌落拱假定, 并考虑偏压地形产生的地层推力对连拱隧道衬砌结构造成的影响, 建立改进的结构-荷载模型进行偏压连拱隧道衬砌结构荷载计算, 并与地层-结构模型以及监测数据比较, 得到改进的结构-荷载模型的适用性。结果表明, 在隧道周边围岩状态较差, 隧道开挖可能引起边坡滑移的情况下, 改进的结构-荷载模型可以很好地预测隧道结构的危险位置, 适用性较好; 对于围岩条件较好或者偏压地形作用不明显时, 计算结果相比地层-结构模型以及实测数据更安全。

关键词: 偏压连拱隧道; 改进荷载-结构法; 计算模型; 监测数据

中图分类号: TU94

文献标识码: A

文章编号: 1673-0836(2017)02-0422-06

Load Calculation of Biased Arch Tunnel Structure and Analysis of Field Monitoring

Li Hui¹, Liu Ke¹, Song Zhanping¹, Shi Botai²

(1. College of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, P.R. China;
2. China Railway No.9 Group Co., Ltd., Shenyang 110013, P.R. China)

Abstract: According to project item and based on double-collapse assumption, impact of layer thrust on arch tunnel lining structure caused by bias topography was considered. The article built up an improved structure-load model to calculate arch tunnel lining load. Then it was compared with both layer-structural model and monitoring data, applicability of the improved models was obtained. The results show that when state of the surrounding wall rock tunnel is poor or tunnel excavation may cause slope slip, the improved structure-load model can well predict the risk position of tunnel structure and has better applicability; when rock is in a better condition or bias layer is not obvious, the result is more conservative compared with layer-structural model and measured data.

Keywords: bias-arch tunnel; improved structure-load method; calculation model; monitoring data

0 引言

连拱隧道是一种双洞大跨度隧道形式, 其线形流畅、占地面积少、空间利用率高, 但其结构形式复杂, 受力特征多变。

近年来, 国内外学者对连拱隧道设计荷载开展

了研究。郑文博等^[1]基于规范中普通分离式隧道松动荷载计算公式, 得到了双洞四车道连拱隧道的松动圈范围和松动荷载的合理取值, 推导出了半经验半理论的连拱隧道松动荷载。朱正国等^[2]应用岩柱理论求得塌落拱曲线方程, 并提出浅埋偏压连拱隧道地层主动偏压载荷和被动不均匀载荷确定

* 收稿日期: 2016-08-17(修改稿)

作者简介: 李辉(1963-), 女, 河南洛阳人, 副教授, 主要从事岩土工程领域的教学与科研工作。

E-mail: 16978670@qq.com

通讯作者: 宋战平(1974-), 男, 陕西薄城人, 教授, 主要从事岩土工程领域的教学与科研工作。

E-mail: songzhpyt@xauat.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(51578447); 西安建筑科技大学人才科技基金(RC1250)

方法及地形偏压情况下隧道支护结构的合理计算方法。李鸿博等^[3]基于普氏平衡拱理论,推导了深埋连拱隧道的土压力荷载计算公式,同时,给出了深浅埋连拱隧道的分界埋深及荷载计算公式,形成了连拱隧道深浅埋荷载计算体系。丁文其等^[4]根据双塌落拱理论对规范进行修正,认为隧道松动压力的计算值应在半结构宽度与整个开挖宽度相应的松动压力之间取值,并推导了连拱隧道的荷载计算公式。余凡等^[6]将连拱隧道整体承载简化为单拱承载计算,取得了较好的拟合效果。申玉生^[8]提出了连拱隧道计算跨度应为连拱隧道总跨度减去中墙厚度,并利用规范规定的松动荷载计算方式计算围岩压力。

然而,连拱隧道往往因为选线原因,大多处于高陡边坡附近。因此,上述许多研究并不一定适用于偏压地形情况,且往往与实际监测情况不符。本文基于双塌落拱假定,对荷载-结构模型进行改进,考虑边坡对衬砌结构产生的不平衡推力;并与地层-结构模型、监测数据进行对比,验证改进的连拱隧道结构计算方法的适用性,为偏压连拱隧道设计与施工提供依据。

1 基于双塌落拱假定的改进连拱隧道结构计算

基于双塌落拱假定^[4],结合公路隧道设计规范(JTGD 70—2004)中围岩压力的计算方法^[11],考虑连拱隧道中墙顶部围岩自重,确定浅埋连拱隧道围岩压力计算方法。图1为连拱隧道塌落拱曲线示意图,图2为浅埋连拱隧道结构受力示意图。

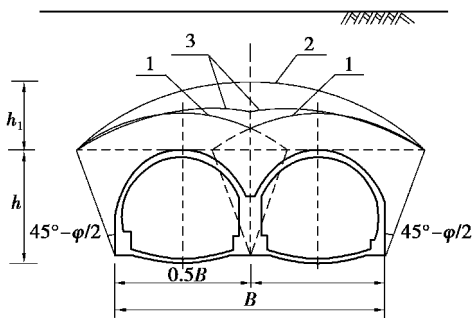


图 1 连拱隧道塌落拱曲线分布示意图

Fig. 1 Collapse curve distribution of arch tunnel

图1中,线1为单洞隧道塌落拱曲线;线2为当隧道开挖宽度为 B 时的塌落拱曲线;考虑连拱隧道特殊性,因中导洞的开挖及中墙的施工会对上部围岩起到支撑作用,故认为连拱隧道塌落拱曲线

3 位于线 1 与线 2 之间。

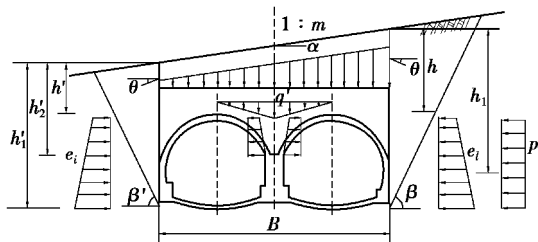


图 2 连拱隧道受力分布示意图

Fig. 2 Stress distribution of arch tunnel

图 2 为浅埋偏压连拱隧道结构受力示意图,其垂直压力值为:

$$Q = \frac{\gamma}{2}[(h + h')B - (\lambda h^2 + \lambda' h_2') \tan \theta] \quad (1)$$

水平围岩压力值为:

内侧: $e_i = \gamma h_i \lambda$; 外侧: $e_i = \gamma h_i' \lambda'$

隧道开挖后边坡产生滑移趋势,考虑边坡滑移对隧道结构产生的地层推力 p 。

不平衡推力法是一种简化的边坡极限平衡稳定性分析方法,假定土条间的作用合力与上一土条的底面平行。不平衡推力法可用于求解当隧道穿过滑移面时隧道结构所受到的土体推力。在计算过程中,隧道开挖支护完成后,认为开挖部分岩体土条的抗滑力为零,并考虑隧道衬砌结构以及中墙的抗剪力。图 3 为土条受力示意图,篇幅有限,只计算隧道结构受到的地层推力 $p(P_{i-1})$ 。

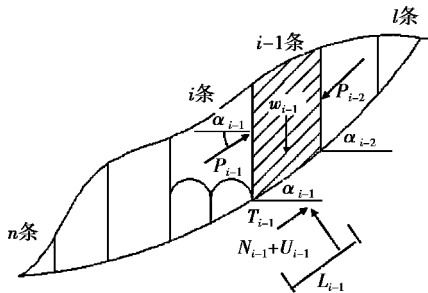


图 3 第 $i-1$ 土条受力图

Fig. 3 Force diagram of the $i-1$ soil strip

对第 $i-1$ 土条进行分析,取土条底面切线和法线方向列出力平衡方程,并根据摩尔-库伦强度准则整理得:

$$P_{i-1} = W_{i-1} \sin \alpha_{i-1} - \frac{[(W_{i-1} \cos \alpha_{i-1} - U_{i-1}) \tan \varphi_{i-1} + c_{i-1} l_{i-1}]}{F_i} +$$

$$P_{i-2}\psi_{i-1} \quad (2)$$

$$p_i = \frac{P_{i-1}}{H} \quad (3)$$

式中:

$$\psi_{i-1} = \cos(\alpha_{i-1} - \alpha_{i-2}) - \frac{\tan\varphi_{i-1}}{F_s} \sin(\alpha_{i-1} - \alpha_{i-2})$$

(4)

式中: H 为土条高度; φ_{i-1} 为传递系数; $\alpha_{i-1}, \alpha_{i-2}$ 为土条底面倾角; P_{i-1}, P_{i-2} 为土条间作用力; W_{i-1} 为土条重力; U_{i-1} 为孔隙水压力; F_s 为安全系数; N_{i-1}, T_{i-1} 分别为条底有效法向力、抗剪力; $c_{i-1}, \varphi_{i-1}, L_{i-1}$ 分别为条底的有效粘聚力、内摩擦角、长度。

2 工程实例分析

2.1 模型的建立及参数取值

龙瑞高速公路在建奔龙坪连拱隧道全长 285 m,最大埋深约为 43.3 m。隧道自然坡度一般为 30°~40°,局部大于 50°。根据地勘报告,隧道处地层岩性为:地表覆盖层为第四系残坡积粉质粘土,下伏基岩为强风化与中风化寒武系砂质板岩、片麻岩。

取典型断面 K20+993 进行分析。对地层-结构模型,根据奔龙坪隧道的工程地质条件及相关规范,模型考虑分层土影响,计算参数如表 1 所示。地层-结构模型如图 4 所示。

对改进结构-荷载模型,衬砌结构受到围岩压力值列于表 2。改进结构-荷载模型作用的荷载为结构自重、水平土压力、竖向土压力和不平衡推力

4 种。因竖向土压力与水平土压力随衬砌结构的深度不同也有所不同,所以利用连续梁单元荷载功能等效加载。隧道仰拱部分,因为隧道开挖土体不能抗拉,所以利用地基弹簧,使用只受压单元(Compression-only)进行边界非线性分析,如图 5 所示。

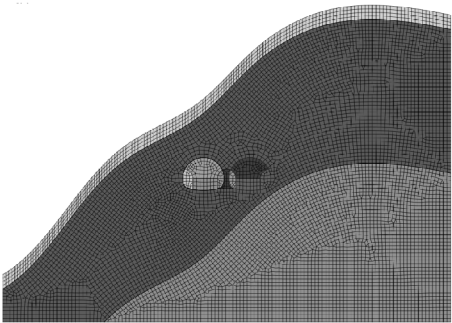


图 4 地层-结构模型
Fig. 4 Layer-structural model

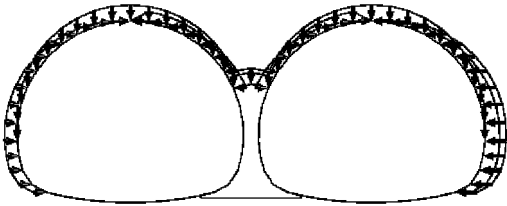


图 5 改进的结构-荷载模型
Fig. 5 Improved structure-load model

表 1 模型计算参数
Table 1 Model calculation parameters

材料名称	弹性模量/ (kN · m ⁻²)	容重/ (kN · m ⁻³)	泊松比	粘聚力/ (kN · m ⁻²)	内摩擦角/ (°)
粉质粘土	15 000	19	0.4	80	20
强风化板岩	1.5e6	20	0.38	180	25
中风化板岩	2e6	20	0.35	250	30
衬砌	28.5e6	25	0.2	—	—
中隔墙	32.5e6	27	0.2		

表 2 围岩压力计算值
Table 2 Calculated values of rock pressure

竖向围 岩压力 Q/kN	附加应 力 $q'/$ $(\text{kN} \cdot \text{m}^{-1})$	衬砌两侧水平围岩压力 $e_i/$ $(\text{kN} \cdot \text{m}^{-1})$				中墙两侧水平 围岩压力 $e_i'/$ $(\text{kN} \cdot \text{m}^{-1})$		总不平 衡推力 P/kN	地层推 力 $p/$ $(\text{kN} \cdot \text{m}^{-1})$
		内侧		外侧					
		e_{i1}	e_{i2}	e_{i1}	e_{i2}	e_{i1}'	e_{i2}'		
8 277.5	70	212.28	281.88	66.12	135.72	139.2	163.56	6 466.8	159.67

2.2 计算结果分析

分析两种不同计算模型下的衬砌受力变形特性。图6和图7为改进结构-荷载模型、地层-结构模型下,衬砌的轴力图及弯矩图。

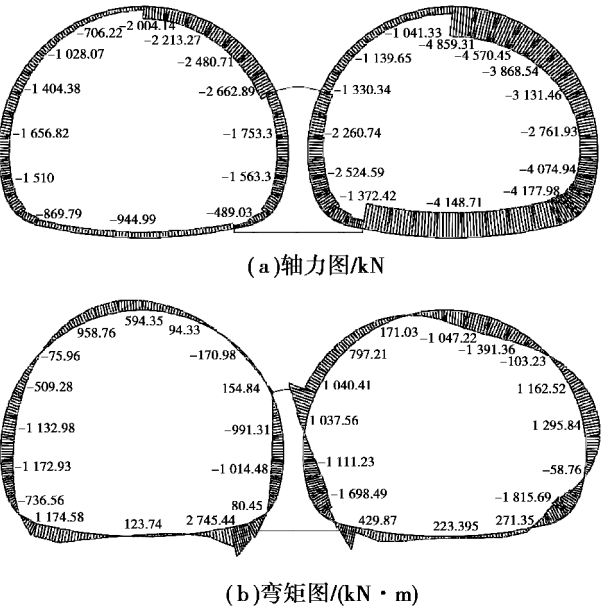


图6 改进的结构-荷载模型计算结果

Fig. 6 Calculated results of improved structure-load model

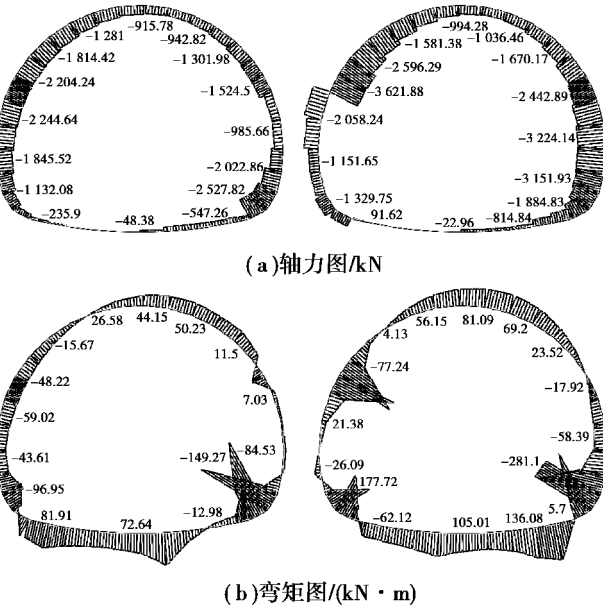


图7 地层-结构模型计算结果

Fig. 7 Result of Layer-structural model

据图6分析,改进结构-荷载模型作用下,右洞轴力整体大于左洞;最大值出现在右洞拱顶偏右处,约为4 910 kN,这是因为该处不仅受到顶部土压力作用,还受到地层不平衡推力作用;左洞拱顶偏右位置轴力较大,因为中墙顶部覆土厚,土压力

以及土体水平作用力也较大。由于地形偏压作用,左右洞弯矩特征并不一样,变形不同;左洞受土的挤压作用拱顶上抬;右洞拱顶处衬砌向下变形,且弯矩很大,约为1 048 kN·m。

据图7分析,对于地层-结构模型计算结果,右洞轴力整体大于左洞,轴力最大位置出现在右洞左侧拱肩以及拱腰处,约为3 100 kN,弯矩与轴力趋势一样,拱脚处、右洞拱肩处弯矩较大。

根据《公路隧道设计规范》,当 $e_0 \leq 0.20 h$ 时,由抗压强度控制承载能力,衬砌结构处于小偏压状态;当 $e_0 > 0.20 h$ 时,由抗拉强度控制承载能力,衬砌处于大偏拉状态。衬砌结构强度安全系数代表衬砌的安全状态,处于小偏压状态时,按式(5)计算,处于大偏拉状态时按式(6)计算。

$$KN = \varphi \alpha R_a b h \tag{5}$$

$$KN = \varphi \frac{1.75 R_l b h}{\frac{6 e_0}{h} - 1} \tag{6}$$

式中: K 为安全系数; N 为轴力; R_a 为混凝土极限抗压强度; R_l 为混凝土极限抗拉强度; α 为偏心影响系数; b, h 为截面宽度和厚度; φ 为纵向弯曲系数。

分析衬砌结构具体位置的受力及偏心情况,结构-荷载模型内力及安全系数如表3;地层-结构模型内力及安全系数如表4。

表3 内力及安全系数(改进的结构-荷载模型)

Table 3 Internal force and safety factor (improved structure-load model)				
	位置	轴力/ kN	弯矩/ (kN·m)	大小 偏心 安全 系数
左洞	拱顶	-2 004.14	594.35	大 3.47
	左侧拱肩	-1 221.47	-75.96	小 29.76
	右侧拱肩	-2 483.35	-170.98	小 14.4
	拱腰	-1 699.6	-736.56	大 1.99
右洞	拱脚	-1 510	-54.27	小 23.91
	拱顶	-4 901.86	-1 047.72	小 5.58
	左侧拱肩	-1 233.17	797.21	大 1.35
	右侧拱肩	-3 477.74	-103.23	小 8.8
	拱腰	-2 804.86	-58.76	小 13.01
	拱脚	-4 074.94	-1 815.69	大 0.83

据表 3 和表 4 分析,结构-荷载模型计算得到的弯矩、轴力值较大,表现为大偏心较多、安全系数较小。这是因为计算时考虑不平衡推力的作用,即边坡的滑移趋势会大大增加衬砌结构的受力。采用结构-荷载模型计算,右洞拱腰、拱脚、拱顶处偏心受拉,安全系数较低。左洞拱腰处由于受到底层挤压作用,受力较大。

表 4 内力及安全系数(地层-结构模型)

Table 4 Internal force and safety factor (layer-structural model)

位置		轴力/ kN	弯矩/ (kN·m)	大小 偏心	安全 系数
左洞	拱顶	-915.78	44.15	小	19.13
	左侧拱肩	-2 045.67	-48.22	小	8.92
	右侧拱肩	1301.98	32.33	小	13.99
	拱腰	-2 101.31	-51.89	小	8.67
右洞	拱脚	-1 132.08	-45.66	小	15.8
	拱顶	-994.78	81.09	大	1.38
	左侧拱肩	-3 104.45	-77.24	小	5.87
	右侧拱肩	-1 670.17	23.52	小	10.93
	拱腰	-3 224.14	-49.92	小	5.66
	拱脚	-2 758.48	-287.2	大	3.94

采用地层-结构模型计算结果比较缓和,只有右洞拱顶、拱脚处处于大偏心。两种计算结果趋势相近,但改进结构-荷载模型结果更保守,即更适用于围岩破碎、边坡稳定性不好的情况。

3 监测资料分析

监测数据可以最直接反应衬砌的受力状态,选用模拟断面(K20+993)处监测资料进行分析,利用压力盒监测隧道围岩压力,利用应变计监测混凝土衬砌内力,利用钢筋计监测钢拱架内力。将数据整理绘制受力状态图,如下图 8~10 所示。

根据图 8 可知,右洞围岩应力大于左洞,最大值出现在右洞拱顶,达 0.916 MPa,左洞拱顶、拱腰以及右洞左拱肩处也较大。这是由于中墙顶部覆土最厚,且衬砌有左移的趋势。

根据图 9 可知,左洞混凝土衬砌受力较均匀,

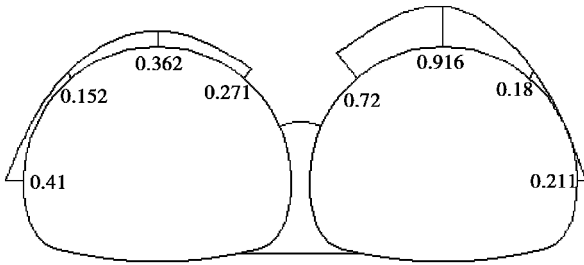


图 8 典型断面围岩应力状态(MPa)

Fig. 8 Rock stress state of typical section (MPa)

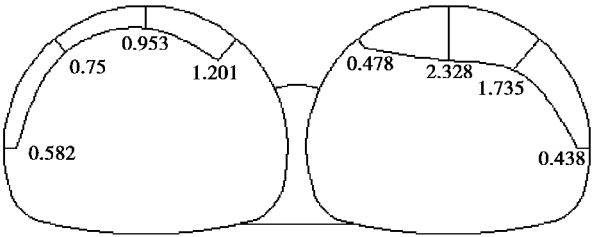


图 9 典型断面混凝土初支内力状态(MPa)

Fig. 9 Internal force state for concrete primary support on typical section (MPa)

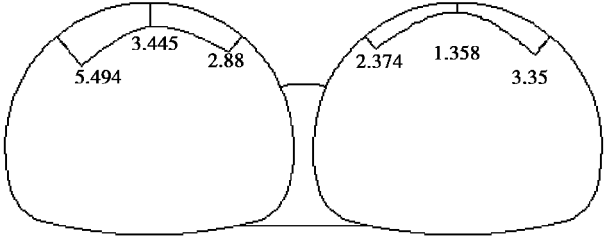


图 10 典型断面钢拱架内力状态(kN)

Fig. 10 Internal force state for steel arch on typical section (MPa)

最大值在右拱肩处;右洞衬砌结构受力不均匀,拱顶及右拱肩内力最大,达 2.328 MPa。这是因为在偏压地形影响下产生不均匀的围岩压力;另外,边坡具有滑移的趋势,会产生不平衡推力作用于衬砌结构上,造成内力变大。

根据图 10 可知,左侧钢拱架内力大于右侧,表面上这与围岩及衬砌结构受力不一致。然而,正是因为边坡具有滑移的趋势,带动着钢拱架也有向左滑移趋势,与左侧围岩相互挤压,才造成较大的钢拱架内力,这也刚好印证了图 8 中左侧拱腰处较大的围岩应力。

4 结论

本文依据双塌落拱理论假定,同时利用不平衡

推力法计算偏压连拱隧道衬砌结构受到的地层推力,建立引入不平衡推力情况下改进的结构-荷载模型进行偏压连拱隧道荷载设计计算,通过与地层-结构模型以及监测数据进行对比分析,验证了改进的结构-荷载模型的适用性。即适用于围岩状态较差、隧道开挖可能引起边坡滑移的情况,可以比较准确地预测衬砌结构的危险位置;对于围岩条件较好或者偏压地形作用不明显时,计算结果与地层-结构法以及监测数据相比更偏于保守。

参考文献(References)

- [1] 郑文博,蔡永昌,石湛,等.连拱隧道设计计算荷载合理取值研究[J].现代隧道技术,2012,49(5):44-49. (Zheng Wenbo, Cai Yongchang, Shi Zhan, et al. Research on reasonable design load values for a multi-arch tunnel[J]. Modern Tunnelling Technology, 2012, 49(5): 44-49.(in Chinese))
- [2] 朱正国,刘志春,孙明磊,等.偏压连拱隧道围岩压力及结构计算[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2010,29(1):75-78. (Zhu Zhengguo, Liu Zhichun, Sun Minglei, et al. Calculation of surrounding rock pressure and structure of multi-arch tunnel under unsymmetrical pressure [J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2010, 29(1): 75-78.(in Chinese))
- [3] 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):3429-3434. (Li Hongbo, Guo Xiaohong. Research on calculation methods of earth pressure on multi-arch tunnel for highway [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(11): 3429-3434.(in Chinese))
- [4] 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 Wenqi, Wang Xiaoxing, Zhu Hehua, 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))
- [5] 邹建华,谭捍华,张学民.连拱隧道初支结构稳定性评价及施工方法探讨[J].地下空间与工程学报,2013,9(6):1362-1367. (Zou Jianhua, Tan Hanhua, Zhang Xuemin. The stability evaluation of primary support structure and discussion on construction method of multi-arch Tunnel [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013, 9(6): 1362-1367.(in Chinese))
- [6] 余凡,杨林德.连拱隧道的荷载及简化计算研究[J].地下空间与工程学报,2006,2(5):770-774. (Yu Fan, Yang Linde. A study arch tunnel and predigesting calculation [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2006, 2(5): 770-774.(in Chinese))
- [7] 李德宏.连拱隧道施工监测与分析[J].现代隧道技术,2003,40(1):59-64. (Li Dehong. Construction monitoring of multi-arch tunnel and its result analysis [J]. Modern Tunnelling Technology, 2003, 40(1): 59-64.(in Chinese))
- [8] 申玉生.软弱围岩双连拱隧道设计施工关键技术研究[D].成都:西南交通大学,2005. (Shen Yusheng. Research on the key technology for design and construction of the double-arch tunnel in the soft surrounding rock [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2005.(in Chinese))
- [9] Akio Takahashi. Construction of glasses-shaped twin tunnel without side drifts and temporary lining of pilot tunnel-daimonji tunnel project of main local road Ibaraki-Kameoka line [J]. Tunnels and Underground (Japanese), 2005, 36(2): 17-26.
- [10] 邓少军,阳军生,张学民,等.浅埋偏压连拱隧道施工数值模拟及方案比选[J].地下空间与工程学报,2005,1(6):940-943. (Deng Shaojun, Yang Junsheng, Zhang Xuemin, et al. Numerical simulation of construction and excavating scheme for shallow multi-arch tunnel under unsymmetrical pressure [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2005, 1(6): 940-943.(in Chinese))
- [11] 中华人民共和国行业标准.公路隧道设计规范(JTG D70-2004) [S].北京:人民交通出版社,2004. (Industrial Standards of the People's Republic of China. For design of road tunnel (JTGD70-2004 Code) [S]. Beijing: China Communications Press, 2004.(in Chinese))