

仰拱一次性开挖长度对黄土连拱隧道稳定性影响研究

钟祖良, 刘新荣, 袁 飞, 瞿万波

(重庆大学土木工程学院, 重庆 400045)

摘 要: 为了研究合理的黄土连拱隧道仰拱一次性开挖长度, 减少工程灾害和加快施工进度, 先从力学机理上分析了仰拱一次性开挖长度对隧道稳定的影响。然后利用有限元方法模拟和自行设计的隧道试验系统进行模型试验, 分析了不同的仰拱一次性开挖长度对地表沉降、洞周附加水平位移和中隔墙的受力影响。最后提出了最佳的黄土仰拱一次性开挖长度, 并应用于黄土连拱隧道的施工。

关键词: 黄土连拱隧道; 仰拱; 开挖长度

中图分类号: U455

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2008)03-0462-05

作者简介: 钟祖良(1980-), 男, 福建龙岩人, 博士研究生, 从事隧道工程研究。E-mail: haiou983@yahoo.com.cn。

Effect of excavation length of inverted arch in one step on stability of multi-arch tunnels in loess

ZHONG Zu-liang, LIU Xin-rong, YUAN Fei, OU Wan-bo

(Civil Engineering College of Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: The reasonable excavation length of inverted arch in one step is an important parameter to the construction of multi-arch tunnels in loess, and it can reduce engineering accidents and accelerate tunnel construction. The effect of different excavation lengths of inverted arch in one step was analyzed by use of the finite element method and model tests. According to the final results of analysis, a reasonable excavation length of inverted arch in one step was put forward and applied to the construction of multi-arch tunnel in loess.

Key words: loess multi-arch tunnel; inverted arch; excavation length

0 引 言

20世纪90年代以来,随着我国国民经济建设的快速发展,特别是西部开发的不断深入,我国公路、铁路等交通建设进入一个高速发展时期。目前,除沿海城市外,我国西部地区大城市间也逐步形成高速公路网,新一轮的建设高潮正在掀起。由于西部多山的地理条件,在公路铁路建设中将会遇到大量的隧道工程。

在隧道工程中,仰拱的设置(包括施工中的临时仰拱和永久仰拱)对维护隧道的整体稳定有着重要的作用,尤其是在地质条件差,侧压大或(和)各向异性程度高、膨胀性趋势大的岩层中,这种作用尤为明显。

王明年等^[1]利用模型试验和有限元方法对有无仰拱对隧道稳定性进行了研究,得出仰拱的施设对提高隧道承载力的影响。此外他们^[2]还对仰拱力学效应的5个影响因素进行了逐一讨论。仇文革^[3]对隧道仰拱的施作时机与纵向效应的试验进行了研究;陈贵红^[4]则对仰拱的型式对隧道稳定的影响进行了研究。但是

无论是分离式隧道,还是连拱隧道,国内外对仰拱沿洞长方向一次性可开挖长度的研究甚少。

由于仰拱沿洞长方向一次性开挖长度对整个隧道的稳定性将起着极大的影响,如果一次性开挖长度超过了连拱隧道初期支护和隧道围岩形成的支撑圈的自稳能力,仰拱开挖段的洞周位移将急剧的增加,初期喷射混凝土会剥落,此外还会引起仰拱开挖段与仰拱已施作段交界面处中隔墙下部发生剪切破坏,导致中隔墙开裂,极大影响隧道的稳定和防渗水。反之,为了确保安全,选择很小的开挖长度,将很大程度上增加施工工序,影响施工进度。因此,本文针对青岛至银川国道主干线山西、陕西一带的黄土的力学特征和地貌特征,利用三维有限元法和模型试验,对偏压黄土连拱隧道仰拱一次性开挖长度进行一系列研究。

基金项目: 国家自然科学基金李晓红创新群体基金资助项目(50621403);教育部“新世纪优秀人才支持计划”项目(NCET-05-0763)

收稿日期: 2007-04-03

1 研究问题

根据参考文献[5~7]提供的浅埋偏压黄土连拱隧道的研究成果可知, 先开挖右洞优于先开挖左洞, 故本文模拟仰拱开挖主要讨论在左右洞上下台阶已挖通及右洞前半段已施筑仰拱的情况下右洞仰拱一次性开挖长度。为了使得各种开挖长度对隧道的稳定影响分析具有可比性, 仰拱开挖断面的设置见图 1 所示。

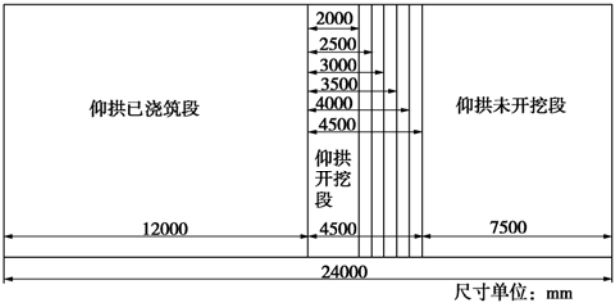


图 1 仰拱开挖研究断面图
Fig. 1 Excavation section of inverted arch

2 仰拱一次性开挖长度对连拱隧道稳定性影响的力学机理分析

从力学观点来看, 隧道就是由岩层支承环与支护组成的相互作用的厚壁圆筒构成的, 而圆筒仅仅在圆环闭合时才在力学上发挥其作用。当隧道仰拱开挖后仰拱开挖处支护受力分析如下: ①仰拱开挖段边墙处的初期支护下端处悬空, 该处初期支护承担的竖向荷载主要靠该段初期支护(锚喷混凝土)与围岩之间的黏结力、锚杆的悬吊作用和钢拱架间焊接的横向钢筋与已施作仰拱段和未开挖仰拱段的初期支护形成的整体作用来共同承担, 即隧道支护具有一定的空间效应。如果仰拱一次性开挖长度超过了该空间效应所能承受的长度, 则在仰拱开挖段中间处的初期支护先发生破坏, 接着带动两侧的支护一起破坏。②仰拱开挖段处中隔墙基础右下方会造成部分悬空, 仰拱开挖段与已施作仰拱段和未开挖仰拱段的两个交接面视为仰拱开挖段中隔墙基础的两个端点, 该处受到的水平向和竖向的剪力最大, 随着一次性开挖长度的增加, 该处所承受的剪力增大, 当该处剪应力超过了钢筋混凝土的抗剪强度时, 中隔墙混凝土开裂。所以仰拱一次性开挖长度对支护结构的应力重分布具有较大的影响。

3 有限元模型的建立

为了分析黄土连拱隧道仰拱一次性开挖长度对隧道稳定影响, 本文采用有限元软件 ANSYS 7.0 进行数值模拟, 其中土体采用 8 节点实体单元 (solid45); 初

期支护喷射 C25 混凝土, 厚度 0.2 m, 采用混凝土单元 solid65 来模拟, 中隔墙、仰拱也采用混凝土单元 solid65 来模拟, 可以考虑反映混凝土压溃和开裂。分析时, 考虑土体服从 Drucker-Prager 屈服准则。ANSYS 程序中有单元“生”与“死”的功能, 可用于模拟分步开挖。开挖步骤为: ①开挖中导洞; ②施作中隔墙; ③开挖右导洞, 施作初期支护; ④开挖左导洞, 施作初期支护; ⑤开挖右洞, 施作初期支护; ⑥开挖左洞, 施作初期支护; ⑦开挖右洞仰拱, 浇筑仰拱和路面; ⑧开挖左洞仰拱, 浇筑仰拱和路面。开挖步序见图 2 所示。

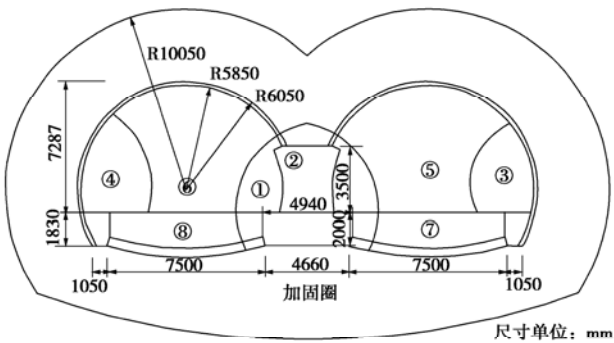


图 2 连拱隧道施工开挖步序
Fig. 2 Excavation sequence of multi-arch tunnel

根据青岛至银川国道主干线山西、陕西一带的黄土地貌特征和黄土连拱隧道的设计情况, 对地形进行了简化。有限元计算模型为: 86 m×61 m×24 m (宽×高×长), 隧道洞室的形状为三线圆, 初始地应力按自重应力场考虑, 计算模型见图 3 所示。根据山西省规划勘察设计院提供的资料可知, 隧道围岩级别为 IV 级, 围岩和支护参数见表 1 所示, 仰拱一次性开挖长度按表 2 进行模拟。

表 1 围岩及支护的物理力学参数					
Table 1 Mechanical parameters of rock and supporting					
名称	E/MPa	μ	c/kPa	$\varphi/(^\circ)$	$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$
Q2 黄土围岩	110	0.30	80	27	18.5
围岩加固圈	165	0.30	270	29	20.0
初期支护	23000	0.20	—	—	22.0
仰拱、中墙	29500	0.20	—	—	25.0
仰拱填充	22000	0.25	—	—	23.0

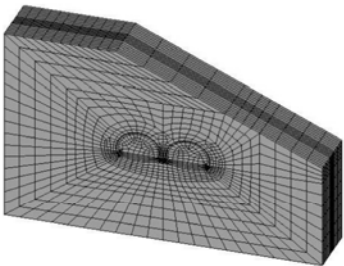


图 3 三维有限元模型
Fig. 3 Three-dimensional finite element model

4 模型试验概况

4.1 物理力学参数的相似关系

根据试验室的设备条件和研究需要,预确定试验几何相似比 $C_l=50$, $C_\gamma=1$ 。根据相似准则推得各物理力学参数原型值与模型值的相似比如下:几何相似比为 $C_l=50$,重度相似比为 $C_\gamma=1$,泊松比、应变、摩擦角相似比为 $C_\mu=C_\varepsilon=C_\varphi=1$ 。强度、凝聚力相似比为 $C_R=C_C=50$ 。围岩通过凝聚力、内摩擦角、重度、弹性模量,中墙通过轴心抗压强度、弹性模量与原型进行相似模拟。

表 2 有限元分析计算工况

Table 2 Operating conditions in finite element method						
计算工况	1	2	3	4	5	6
仰拱一次性开挖长度/m	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5

4.2 模型相似材料

(1) 黄土连拱隧道的围岩物理力学参数

根据陕西、山西省勘察的黄土连拱隧道地质资料可知,隧道围岩由第四系中更新统离石组(Q₂l)黄土组成,处于坚硬状态,呈巨块状整体结构,柱状节理发育,无地下水赋存。隧道围岩类别判定为IV级围岩中较差的情况。隧道围岩参数见表3所示。隧道围岩模型材料采用砂、石膏、膨润土和页岩土混合材料。

表 3 围岩模型与原型的物理力学参数

Table 3 Mechanical parameters of model and tunnel rock					
材料名称	$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	μ	E_s/MPa	$\varphi/(^{\circ})$	c/kPa
隧道围岩	18.5	0.3	537.5	27	80.0
模型材料	20.0	0.3	10.8	26	1.6

(2) 支护结构的几何参数

按相似理论推得的支护结构几何参数见表4所示。

(3) 支护材料的物理力学指标

a) 喷射混凝土、中墙、仰拱混凝土

试验采用石膏质量比2.7:1的特种石膏材料模拟C25的喷射混凝土,中墙、仰拱混凝土,喷射混凝土通过人工现场喷涂的方法模拟,中墙、仰拱混凝土通过现场预制加工安装。力学指标取30 min的试验值,参数为单轴抗压强度0.25 MPa,对应原型值12.5 MPa;弹性模量0.46 GPa,对应原型值23 GPa。

b) 锚杆

表 4 支护结构原型与模型的几何参数

Table 4 Mechanical parameters of model and tunnel supporting							
类别	锚杆			喷射混凝土/cm	钢支撑/cm	仰拱混凝土/cm	仰拱主筋/cm
	长度/cm	环距/cm	纵距/cm				
原型	400	100	100	20	16号工字钢@50	50	Φ2.2@25
模型	8	2	2	0.4	Φ0.6@2	1	Φ0.1@1

试验采用直径为2 mm,长为8 cm的铜线模拟锚杆,用环氧树脂作胶结,在其表面均匀粘一层细石英砂,通过原型与模型等效抗拉刚度EA采用预埋法埋入设计位置的方法来模拟全长粘结型锚杆。

c) 中墙、仰拱主筋

试验采用中墙、采用直径1 mm的铁质材料通过原型与模型等效抗拉刚度EA的方法模拟;仰拱混凝土主筋通过原型与模型等效抗弯刚度EI的方法模拟。

4.3 试验装置

试验在自行设计的隧道试验系统进行,试验模型槽用两组槽钢对模型槽前后进行约束,使围岩处于平面应变状态,在模型槽的左右内表面粘一层厚1 mm的聚四氟乙烯板,以此来减小模型槽边界效应对试验的影响,试验模型槽的尺寸(长×宽×高)为1.72 m×0.48 m×1.23 m。试验装置如图4所示。

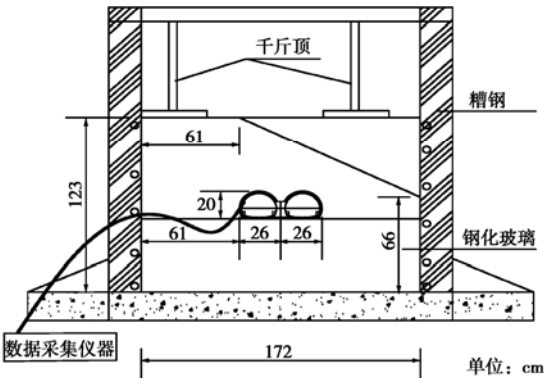


图 4 模型试验装置图

Fig. 4 Model test system

4.4 试验量测项目

(1) 洞室周边径向位移量测

洞室周边径向位移分别在右拱顶、右边墙、拱腰、拱脚处设置6个测点,采用0.01 mm精度的位移计直接量测,测点布置见图5。

(2) 中墙应力量测

在中墙顶部、中部和底部对称布设环向电阻应变片,通过电阻应变仪直接将数据采入计算机,有专用数据软件算出中墙左右两侧的应力。

(3) 地表沉降量测

在隧道地表斜面一侧布设相对刚度较小的特殊元件,用0.01 mm精度的位移计直接量测。

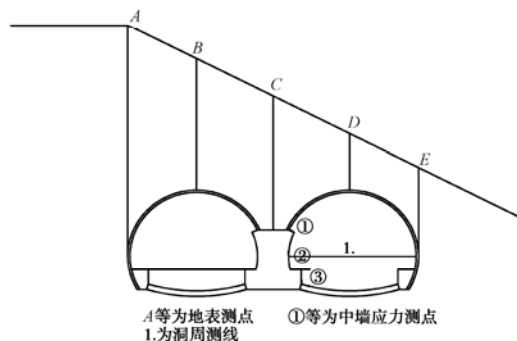


图5 断面测点布置图

Fig. 5 Arrangement of test points

5 研究结果分析

5.1 仰拱一次性开挖长度对地表沉降的影响

本文主要研究仰拱开挖段中断面处地表的沉降量。由图6和图7反映出仰拱一次性开挖长度对偏压黄土连拱隧道地表附加沉降量的影响趋势。根据数值模拟和模型试验结果来看,当仰拱一次性开挖长度在3 m以下时,对偏压黄土连拱隧道顶部的地表附加沉降影响不显著。当仰拱一次性开挖长度超过4.0 m时,地表各典型监测点的附加沉降显著增加。在这些典型的地表沉降监测点中,点A、B受仰拱一次性开挖长度的影响较小,中墙顶部地表C点和右洞拱顶上方地表D点处受到影响较大,点E受影响次之。

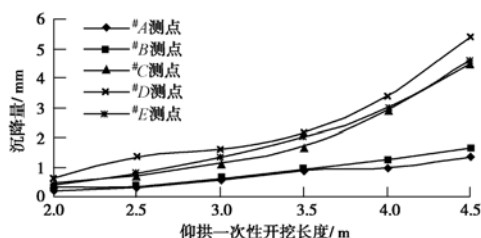


图6 数值模拟结果分析图

Fig. 6 Analysis of numerical simulation results

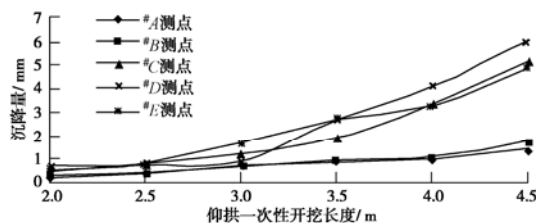


图7 模型试验结果分析图

Fig. 7 Analysis of model test results

5.2 仰拱一次性开挖长度对仰拱开挖面前后隧道洞周水平位移的影响

图8和图9反映出仰拱一次性开挖长度对仰拱开挖面前后隧道洞周附加水平位移的影响。各洞周位移研究断面的布置见图1所示,洞周位移测线的布置见

图5所示。从数值模拟和模型试验结果来看,仰拱一次性开挖长度对仰拱开挖面前后隧道洞周附加水平位移的影响大于对地表沉降的影响。从仰拱开挖面前后6 m测得的洞周附加水平位移来看,由于开挖段前已施筑仰拱,初期支护和仰拱形成闭合的圆环,仰拱一次性开挖长度对其影响较小。而从仰拱开挖面后6 m内的洞周附加水平位移来看,所受影响较大。当仰拱一次性开挖长度小于3.0 m时,仰拱开挖段前6 m范围内洞周附加水平位移值一般在3 mm之内,可以认为基本上不产生影响;而对于开挖面后6 m的洞周附加水平位移保持在8 mm之内。当仰拱一次性开挖长度大于3.5 m时,仰拱开挖面后6 m范围内洞周附加水平位移量明显加大。仰拱一次性开挖长度为4.0 m时,开挖段的附加水平位移达到10 mm多,对初期支护和中隔墙的稳定产生较大的影响。

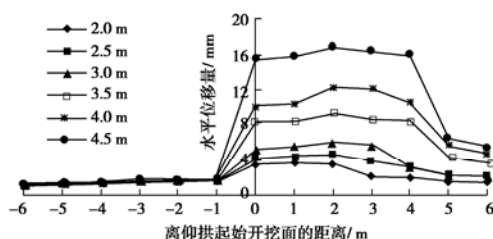


图8 数值模拟结果分析图

Fig. 8 Analysis of numerical simulation results

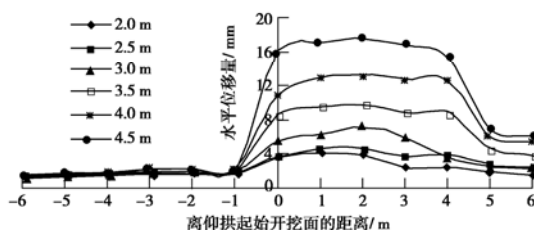


图9 模型试验结果分析图

Fig. 9 Analysis of model test results

5.3 仰拱一次性开挖长度对分隔墙受力影响

通过数值模拟和模型试验测得的仰拱开挖段及其前后段6 m范围内分隔墙受力情况,通过比较分析发现,仰拱开挖面处分隔墙断面的测点应力值最大,图10和图11列出了该断面处各测点的大小主应力值随仰拱一次性开挖长度的变化趋势。从测得数据可以看出,当仰拱一次性开挖长度在3.0 m以下时,该断面的各点的大小主应力和剪应力都较小,当仰拱一次性开挖长度为4.0 m时,各测点测得大小主应力增长迅速,从数值模拟的图来看,在开挖面处分隔墙混凝土开始出现塑性变形,如果再继续增加仰拱一次性开挖长度(即5.0 m),有限元程序计算无法收敛,根据查看最后荷载子步计算的数据推测分隔墙已发生破坏,而从模型试验也可以观察到开挖面处的分隔墙截面出现一条纵向裂缝,并慢慢扩展,直至发生剪切破坏。

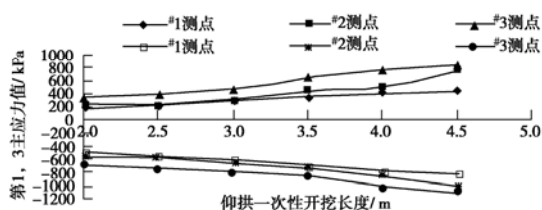


图9 数值模拟中各测点大小主应力随仰拱开挖长度变化趋势

Fig. 9 Variation of the maximum and minor principal stresses with excavation length of inverted arch in numerical simulation method

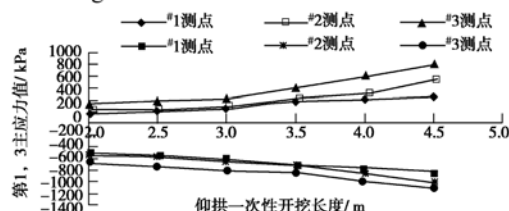


图10 试验模型中各测点大小主应力随仰拱开挖长度变化趋势

Fig. 10 Variation of the maximum and minor principal stresses with excavation length of inverted arch in model test method

6 工程应用

由于近几年来,我国才开始在黄土地区修建连拱隧道,对其修建技术一直都是工程界及其关注的事情。我国首条黄土连拱隧道——山西汾离黄土连拱隧道仰拱开挖时参考软岩地区隧道开挖的经验,一次性开挖长度选择6 m,导致中隔墙开裂,初期支护变形较大,而采用较短的仰拱开挖长度为2 m时,施工进度进展较慢,影响隧道的施工工期。针对以上的问题,利用数值模拟和模型试验的结果,课题组提出黄土连拱隧道合理的仰拱一次性开挖长度为3~3.5 m,考虑到二衬模筑台车的模数,提出黄土连拱隧道的最佳的仰拱开挖长度为3 m。从现场的应用来看,仰拱一次性开挖长度为3 m取得较好的施工效果。从现场监测的数据可以看出,仰拱开挖段上方地表沉降最大值为D点,为4~5 mm;洞周最大附加水平位移为距离仰拱开挖面1.3 m处,为7~9 mm;据测得的中隔墙的应力值可计算出中隔墙大小主应力值最大处为#3测点, $\sigma_1 - \sigma_3 \approx 1200 \sim 1300$ kPa。根据第三强度理论可知, $\sigma_1 - \sigma_3 < \sigma_y$, 没有超过钢筋混凝土的极限抗拉强度,保持较大的安全储备。此外,在山西的王家会等黄土连拱隧道的开挖时进一步得到应用。

7 结 语

黄土连拱隧道修建技术是隧道工程的一个重要的研究分支。通过数值模拟和模型试验,并结合实际工程的施工可以得出如下结论:

(1)黄土连拱隧道仰拱的一次性开挖长度对开挖段处围岩和支护的应力二次重分布具有一定的影响,应严格控制仰拱一次性开挖长度,并应尽快形成闭合

环型支护,有利于控制隧道围岩变形。

(2)仰拱一次性开挖长度对洞周位移影响最大,对中隔墙应力影响和地表沉降的影响次之。

(3)根据数值计算和相似模型试验结果可知,黄土连拱隧道仰拱的一次性开挖长度保持在3.0~3.5 m左右,为了符合二衬台车模数,应尽量保持在3.0 m左右,有利于控制地表沉降、洞周围岩的附加水平位移和中隔墙的受力,确保初期支护不发生大变形而坍塌和中隔墙不发生剪切破坏,使得隧道支护具有较好的耐久性。

参考文献:

- [1] 王明年, 翁汉民, 李志业. 隧道仰拱的力学行为研究[J]. 岩土工程学报, 1996, 18(1): 47 - 53. (WANG Ming-nian, WENG Han-min, LI Zhi-ye. Study on the mechanics behaviour of tunnel invert[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 18(1): 47 - 53. (in Chinese))
- [2] 王明年, 关宝树. 仰拱对维护隧道整体稳定的力学行为的研究[J]. 隧道建设, 1993(4): 11 - 18. (WANG Ming-nian, GUAN Bao-shu. Study on the mechanics behaviour of tunnel invert to maintain tunnel stability[J]. Tunnel Construction, 1993 (4): 11 - 18. (in Chinese))
- [3] 仇文革. 隧道仰拱的施作时机与纵向效应的试验分析[J]. 西南交通大学学报, 1993(6): 68 - 74. (QIU Wen-ge. Test analysis of the construction time and the longitudinal direction effect of tunnel invert[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 1993(6): 68 - 74. (in Chinese))
- [4] 陈贵红. 仰拱型式对隧道结构的影响[J]. 公路, 2004(11): 145 - 48. (CHEN Gui-hong. Influence of invert pattern on tunnel structure[J]. Highway, 2004(11): 145 - 148. (in Chinese))
- [5] 孙 辉. 黄土连拱隧道围岩与支护结构稳定性研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2005. (SUN Hui. Study on stability of the rock and the liner structure in the loess doubled-arch tunnel[D]. Chongqing: Chongqing University, 2005. (in Chinese))
- [6] 刘新荣, 孙 辉, 陈晓江. 黄土连拱隧道二次衬砌的结构分析与监测研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(6): 695 - 697. (LIU Xin-rong, SUN Hui, CHENG Xiao-jiang. Structural analysis and monitoring for secondary lining of doubled arch tunnel in loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(6): 695 - 697. (in Chinese))
- [7] LIU X R, SUN H, ZHANG Y X, GUO C. Stability analysis of lishi loess doubled arch tunnel[M]. Eurorock, 2005.