

耳墙式隧道结构受力特征研究

陈秋南^{1, 2}, 赵明华², 高文华¹, 黄胜平¹

(1. 湖南科技大学土木工程学院, 湖南 湘潭 411201; 2. 湖南大学土木工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要: 基于连拱隧道洞口端存在严重偏压和边坡高陡现象, 设计一种新颖特殊隧道——耳墙式隧道, 即在深埋侧设计隧道浅埋侧路堑的结构形式。以常德—吉首高速公路殿会坪隧道为工程背景, 建立有限元数值计算模型, 针对洞口边坡不同的地形偏压率 $P=7.0$, $P=4.0$, $P=2.5$ 对应3种工况分析研究隧道围岩、耳墙和支护结构典型断面的受力特征, 优化该隧道的设计和施工工序。研究结果表明地形偏压率 $P=4.0$ 时结构受力比较合理, 也进一步验证了该工程设计的合理性。

关键词: 耳墙式隧道; 结构受力; 大小主应力; 地形偏压率

中图分类号: U451, TU456

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2010)02-0291-05

作者简介: 陈秋南(1968-), 男, 教授, 博士后, 从事岩土与隧道工程教学与科研工作。E-mail: cqndoc@163.com。

Mechanics of tunnel structure with ear wall

CHEN Qiu-nan^{1, 2}, ZHAO Ming-hua², GAO Wen-hua¹, HUANG Sheng-ping¹

(1. School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China; 2. School of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: Tunnel with ear wall is a new special tunnel in highways, and it is applied to the end or exit of unsymmetrical pressure multi-arch tunnel. According to a case study of Dianhuiping multi-arch tunnel project, a FEM model for tunnel with ear wall is established. Mechanical characteristics of surrounding rock, ear wall and supporting structure are analyzed based on different ratios of unsymmetrical pressure P ($P=7.0$, $P=4.0$, $P=2.5$). Design and construction procedures of the tunnel with ear wall are optimized. Research results show that mechanics of surrounding rock, ear wall and supporting structure are reasonable when the ratio of unsymmetrical pressure is 4.0, and prove that the design of the tunnel with ear wall is successful and reasonable.

Key words: tunnel with ear wall; mechanical characteristic of structure; major and minor principal stress; ratio of unsymmetrical pressure

0 前言

连拱隧道跨度大、施工工序复杂, 偏压比较严重, 适用于山区地形狭窄和桥隧相连路段等, 或对两洞间距有特殊要求的中、短隧道, 其最大优点是双洞轴线间距可以较小, 可减小占地, 便于洞外接线, 一般长度为 500 m 左右^[1-2]。在隧道洞口边坡高陡地段, 往往造成隧道一侧无法进行暗洞施工, 另一侧隧道洞室则埋深较深, 完全有条件进行暗洞开挖。若完全开挖成深路堑或两侧洞室都施作明洞, 势必形成高陡边坡, 而且挖方及回填量都很大, 对地表植被会造成很大的破坏^[3-5]。针对该问题, 湖南常德——吉首高速公路的殿会坪隧道出口段采用了一种特殊的隧道结构形式——左车道为隧道右车道为路堑, 即将埋深较浅一侧改为路堑, 埋深较深一侧仍采用隧道结构, 中间是一堵连拱隧道中墙延伸段且能承受边坡推力的耳墙, 该结构

形式简称为“耳墙式隧道结构”。该隧道结构适用于洞口近接高陡边坡, 可以承担高陡边坡部分水平推力, 与半明半暗连拱隧道结构和棚洞结构相比, 耳墙式隧道结构是目前国内外少见的, 其施工力学机理比较复杂^[6-7]。

1 地形偏压率的概念

耳墙式隧道结构应力应变特征与左侧高陡边坡性状和稳定性密不可分, 两者相互影响, 隧洞开挖使得左侧边坡稳定性发生变化, 由此影响隧道支护结构和耳墙的性状, 而隧道支护结构和耳墙的性状也影响着地形偏压率。耳墙式隧道及其相互影响的高陡边坡工

基金项目: 国家自然科学基金项目(50874043); 湖南省自然科学基金项目(08JJ311); 湖南省教育厅青年基金项目(08B025)

收稿日期: 2008-10-07

程如图 1 所示。

取高程相同、水平相对距离为隧道跨度宽的一系列节点，将埋深较大节点与埋深较小节点的竖向应力比值 s_{y2}/s_{y1} 定义为地形竖向偏压率 $P^{[8-10]}$ （以下简称偏压率）。耳墙式隧道结构左洞最小埋深 h_0 约 3.5 m，单洞跨度 D 取 10.5 m，且模型岩体材料只考虑单一风化板岩，边坡坡度用 e 表示，应用公式 $P=1+eD/h_0$ 可换算得边坡坡度为 2：1，1：1 和 1：2 时对应的偏压率 P 分别为 7.0，4.0，2.5。利用有限元方法模拟分析了耳墙式隧道结构在不同偏压率（ $P=7.0$ ， $P=4.0$ ， $P=2.5$ ，分别对应工况一、工况二和工况三）下围岩和耳墙应力场和支护结构受力情况，并结合工程实际情况，得出耳墙式隧道结构受力最合理的边坡坡度。



图 1 耳墙式隧道结构
Fig. 1 Tunnel structure with ear wall

2 耳墙式隧道结构受力特征

基于同济曙光软件，建立耳墙式隧道结构在偏压率 P 分别为 7.0，4.0 和 2.5 时的有限元平面模型。模型基于以下 4 个基本假定：①隧道的受力和变形是平面应变问题，不考虑空间效应；②岩体初始应力场不考虑构造应力，仅考虑其自重应力；③岩体材料采用 Drucker-Prager（D-P）模型；④假定围岩应力释放率在开挖和初期支护分别为 60%和 40%。计算模型单元网格见图 2。

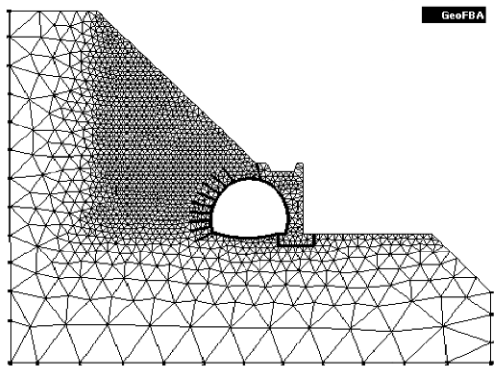


图 2 耳墙式隧道结构单元网格
Fig. 2 Meshes for tunnel structure with ear wall

2.1 耳墙式隧道结构施工工序

耳墙式隧道结构施工工序十分复杂，为了便于分析，对施工工序做了必要简化，左洞采用上下台阶法开挖。其施工工序：

- (1) 右侧路堑开挖及边坡加固。
- (2) 耳墙浇筑及墙后回填。
- (3) 左洞上台阶开挖及初次支护。
- (4) 左洞下台阶开挖及初次支护。
- (5) 左洞仰拱、二衬浇筑。

2.2 耳墙式隧道结构模型计算参数

根据工程实际情况，隧道出口段经过多次刷坡处理，山体表层（碎石土）已被清除，岩体为单一弱风化板岩，围岩级别为 V 级。考虑到对山体进行了注浆加固，弱风化板岩力学参数适当加大。喷射混凝土支护结构力学参数综合考虑喷射混凝土和钢拱架作用进行取值，二次衬砌和耳墙的力学参数参照《殿会坪隧道施工变更设计图》和《公路隧道设计规范》^[1]进行取值（见表 1）。耳墙式隧道结构支护设计如图 3。

表 1 材料物理力学参数

Table 1 Physicomechanical parameters of materials					
材料	ρ /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	E /GPa	μ	c /kPa	ϕ /($^\circ$)
弱风化板岩	23.2	2.6	0.23	2500	48
喷射混凝土	24.5	27.5	—	—	—
锚杆	77.0	210.0	—	—	—
二衬	25.4	29.5	—	—	—
耳边墙	25.4	31.5	0.20	1900	55

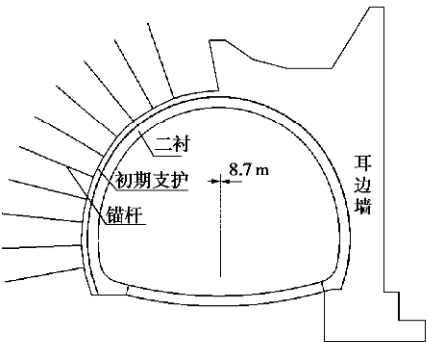


图 3 耳墙式隧道结构支护设计图

Fig. 3 Supporting structure of tunnel structure with ear wall

2.3 计算结果说明及特征点布置

数值模拟结果中，应力计算“+”表示拉应力，“-”表示压应力。梁单元（或杆单元）轴力计算“+”表示压力，“-”表示拉力。水平收敛位移计算“+”表示向右，“-”表示向左。竖直方向位移计算（或拱顶下沉量）“+”表示向上，“-”表示向下。隧道围岩和耳墙特征点分布如图 4。

表 2 各工况特征点 s_1 , s_3 最终值

Table 2 Ultimate stress of key points		MPa			
偏压率	主应力	A 点	B 点	C 点	E 点
$P=7.0$	s_1	0.237	0.168	0.033	-0.37
	s_3	-0.245	-0.054	-0.532	-1.775
$P=4.0$	s_1	0.136	0.094	0.018	-0.408
	s_3	-0.188	-0.038	-0.414	-1.392
$P=2.5$	s_1	0.078	0.12	0.014	-0.218
	s_3	-0.089	-0.037	-0.294	-0.963

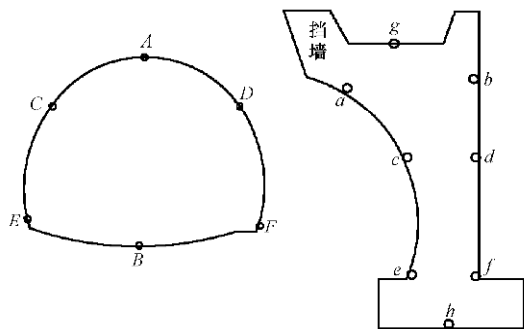


图 4 耳墙式隧道结构和耳墙断面特征点布置

Fig. 4 Layout of key points on section of tunnel with ear wall

2.4 围岩受力特征分析

3 种工况围岩 s_1 分布规律大致相同, 但数值大小相差较大。上台阶开挖及初支后, 在拱顶存在一拉应力区, 工况一、工况二和工况三 A 点 s_1 值分别为 0.321, 0.134 和 0.083 MPa。同时在下台阶未开挖岩体上表面与回填土之间也出现拉应力集中, 应力分布大小与拱顶相当。下台阶开挖及初支后, 拱部拉应力有所减小, 但由于围岩向外挤压, 在隧道底板右侧出现较高拉应力区, 工况一 s_1 最大值达到 0.481 MPa, 工况二和工况三分别为 0.3071 MPa 和 0.193 MPa, 由于该处围岩是否稳定影响到耳墙基础稳定, 隧道施工时应及时修筑仰拱, 来消减左侧山体对耳墙底部的水平推力。

上台阶开挖及初支后, 隧洞拱部形成松动区, 围岩应力较低, 压应力很小, 下台阶未开挖岩体的应力也较低, 工况一、工况二和工况三 A 点 s_3 最大值分别为 -0.121, -0.095, -0.051 MPa。由于山体推力作用, 围岩与支护结构产生一定程度的挤压作用, 在左拱脚和耳墙基础左侧底部出现较高的压应力区, C 点在工况一时 s_3 最大, 压应力为 -2.529 MPa, 工况二和工况三分别为 -2 MPa 和 -1 MPa, 分别是各工况隧道施工过程中最大压应力。下台阶开挖及初支后, 围岩应力进一步释放, 支护结构开始承受了较大荷载, 除了左边墙脚由于应力集中导致压应力值增大外, 隧道其他区域围岩应力都有所减小, 同时在隧道底板出现低应力区。

二衬浇筑后, 各工况围岩特征点 s_1 , s_3 值见表 2。由表 2 可知, 工况一 A, B, C 三个特征点的拉应力或压应力值均大于其它工况对应的特征点。

2.5 耳墙结构受力特征分析

耳墙是作为抵抗山体推力的主要承载结构之一。图 5 为工况一、二和三各特征点的 s_1 分布。耳墙施作和左侧回填后, 主要承受由顶部和下部回填岩体传递的水平推力, 耳墙弧顶位置 (a 点) 和基础底部 (h 点) 出现较大拉应力, 工况一、工况二和工况三 a 点的 s_1 值分别为 0.177, 0.162, 0.143 MPa, h 点 s_1 分别为 0.227, 0.211, 0.188 MPa, 三种工况应力值相差不大。上台阶开挖及初支后, 围岩应力骤然释放, 耳墙承受的水平推力急剧增大, 底部拉应力随之增大, 三种工况 h 点 s_1 值分别为 0.764, 0.583, 0.344 MPa。弧顶处拉应力消失, 在耳墙顶部水平位置出现水平层状拉应力带, s_1 值与基础底部相当。同时, 在耳墙左侧中部区域开始出现拉应力, 中心处 (d 点) 应力值最大, 往耳墙上下两端递减, 直至拉应力消失。工况一、工况二和工况三 d 点的 s_1 值分别为 0.939, 0.553, 0.337 MPa。下台阶开挖及初支后, 耳墙中部左侧、顶部水平位置和基础底部拉应力值明显增大。工况一、工况二和工况三 g 点的 s_1 值分别达到 1.2, 0.838, 0.49 MPa, h 点 s_1 值分别为 0.996, 0.725, 0.54 MPa, d 点的 s_1 值在整个耳墙结构中最大, 三种工况分别达到了 1.63, 0.915, 0.746 MPa, 是各工况施工过程中耳墙出现的最大拉应力, 在设计和施工中要防止耳墙左侧混凝土发生拉裂破坏, 隧道施工结束和背后填土完成后, 耳墙受力逐渐稳定。

耳墙浇筑后, 作为挡墙结构开始承受山体边坡的水平推力, 整个耳墙有向右转动趋势。在底部右侧拐角处出现压应力集中区, 工况一、工况二和工况三 f 点 s_3 值分别为 -0.75, -0.67, -0.7 MPa, 应力值非常接近。上台阶开挖及初支后, 耳墙内侧压应力急剧增大, 沿着耳墙弧形产生一高应力区, 其中 c 点附近压应力最大, 工况一、工况二和工况三 c 点附近 s_3 最大值分别达到 -3.01, -2.12, -1.47 MPa。同时, f 点周围压应力也继续增大。下台阶开挖及初支后, 耳墙承受山体推力进一步增加, 内侧弧形高应力区压应力继续

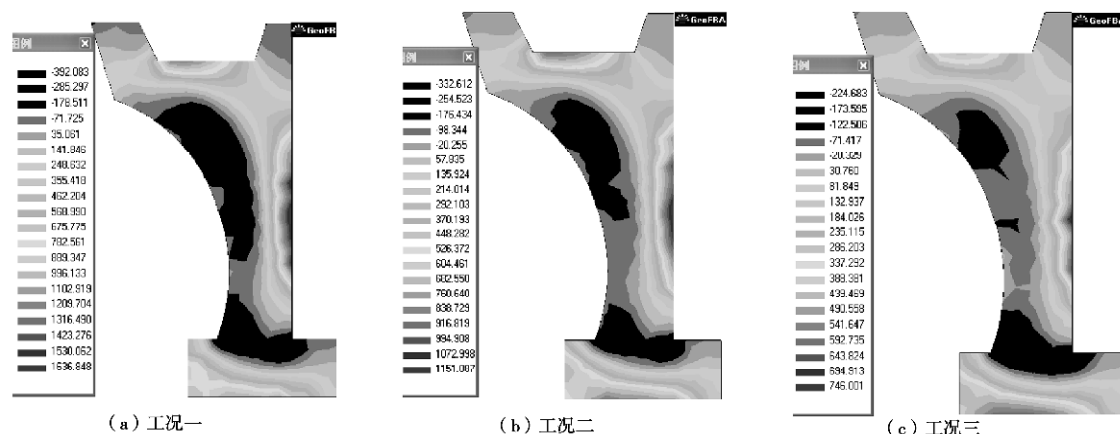
图5 各工况耳墙 S_1 分布

Fig. 5 Major principal stress of ear wall

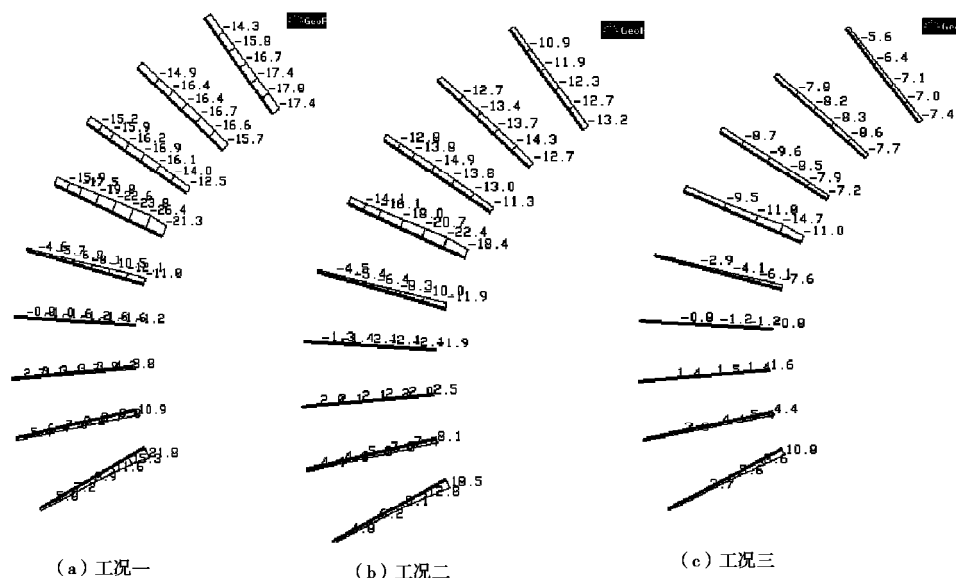


图6 各工况锚杆最终轴力分布

Fig. 6 Ultimate axial force of anchor bar

增大,但应力集中区位置下移 0.5 m 左右。工况一、工况二和工况三耳墙 S_3 最大值分别达到-3.7, -2.74, -2.02 MPa。

由以上分析可知,耳墙最不利受力位置是耳墙基础底部和中部,其中基础底部和中部右侧承受了较大拉应力,容易出现混凝土拉裂破坏;中部左侧承受了较大压应力,应防止出现局部压力过大而导致混凝土压碎破坏的现象。

2.6 锚杆轴力分析

耳墙式隧道结构只在左侧拱腰和边墙打设系统锚杆。图6为3种工况锚杆最终轴力分布。

上台阶开挖及初支后,拱脚处锚杆受压,且轴力值很小;拱腰处锚杆都受拉,离拱顶最近的锚杆轴力最大;工况一、工况二和工况三锚杆轴力最大拉力值

分别为-15.3, -11, -5.5 kN。下台阶开挖及初支后,拱腰处锚杆轴力有所增大,其中拱脚锚杆受力由压变拉。拱腰处锚杆受拉,且都呈现中间大,两端小的特点;边墙处锚杆受压,同一根锚杆压力值浅端最大,深端最小。锚杆最大拉力位于拱脚,工况一、工况二和工况三锚杆轴力最大拉力值分别为-26.2, -22, -14.3 kN;锚杆轴力最大压力值位于墙脚,3种工况锚杆轴力最大压力值分别为21, 17.6, 10 kN。

3 结 论

引入了地形偏压率 P 的概念,建立耳墙式隧道结构典型断面有限元分析模型,分析了 P 分别为7.0, 4.0和2.5三种工况下隧道围岩和耳墙应力场及支护结构的受力情况。3种工况下围岩应力、耳墙应力和支护结

构受力情况随施工步骤的变化而变化, 隧道结构施工完毕和背后填土结束, 其应力基本趋于稳定。通过计算得出以下结论:

(1) 围岩最大拉应力出现在隧道底板右侧与耳墙基础相交位置, 工况一、工况二和工况三该处拉应力值分别为 0.481, 0.307, 0.193 MPa; 围岩最大压应力位于左拱脚, 工况一、工况二和工况三该处压应力值分别为 -2.529, -2, -1 MPa。

(2) 耳墙最大拉应力区出现在中部左侧 d 点, 工况一、工况二和工况三 d 点拉应力值分别为 1.63, 0.915, 0.746 MPa; 3 种工况耳墙最大压应力分别为 -3.7, -2.74, -2.02 MPa, 都位于内侧 c 点下方 0.5 m 处。耳墙最大压应力值都远小于抗压设计值, 但工况一中最大拉应力超过了抗拉设计值, 工况二和工况三小于抗拉设计值, 因此在控制耳墙应力方面, 工况三优于工况一和工况二。

(3) 工况一、工况二和工况三锚杆最大拉力分别为 -26.2, -22, -14.3 kN, 锚杆最大压力分别为 21, 17.6, 10 kN。在初期支护受力方面, 3 种工况没有明显差别。

在围岩和耳墙受力方面, 相对工况二和工况三而言, 工况一所受的拉应力、压应力最大; 在围岩和耳墙及支护结构受力方面, 3 种工况差别不大, 综合来看, 工况三优于工况一和工况二。从理论上分析, 偏压率 P 越小, 结构越安全, 而实际工程中, 要减小偏压率, 就得减小边坡坡度, 这就需要大量刷坡和破坏周边环境等方面的问题。通过数值模拟分析, 比较工况二和工况三的计算结果, 并结合殿会坪耳墙式隧道结构实际工程, 得出地形偏压率 $P=4.0$, 即左侧边坡坡度为 1:1 时结构受力比较合理的结论, 这也验证了实际工程设计的合理性。

参考文献:

- [1] JTGD70—2004 公路隧道设计规范[S]. 2004. (JTGD70—2004 Design specifications for highway tunnel[S]. 2004. (in Chinese))
- [2] 夏才初, 龚建伍, 唐颖, 等. 大断面小净距公路隧道现场监测分析研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, **26**(1): 45 - 50. (XIA Cai-chu, GONG Jian-wu, TANG Ying, et al. Study on site monitoring of large-section highway tunnels with small clear spacing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, **26**(1): 45 - 50. (in Chinese))
- [3] 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))
- [4] 贾剑青, 王宏图, 李晓红, 等. 复杂条件下隧道支护体时效可靠性探讨[J]. 岩土工程学报, 2008, **30**(3): 390 - 393. (JIA Jian-qing, WANG Hong-tu, LI Xiao-hong, et al. Time-reliability of tunnel support under complex conditions[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, **30**(3): 390 - 393. (in Chinese))
- [5] 朱维申, 何满潮. 复杂条件下围岩稳定性与岩体动态施工力学[M]. 北京: 科学出版社, 1996. (ZHU Wei-shen, HE Man-chao. Stability of surrounding rocks and the moving constructing mechanics of rock masses under complicated situations[M]. Beijing: Science Press, 1996. (in Chinese))
- [6] 陈秋南, 黄胜平. 复杂地质条件下连拱隧道信息化施工[J]. 湖南科技大学(自然科学版), 2007, **22**(4): 46 - 49. (CHEN Qiu-nan, HUANG Sheng-ping. Application and construction monitoring of multi-arch tunnel under complex conditions[J]. Chinese Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2007, **22**(4): 46 - 49. (in Chinese))
- [7] 黄胜平. 复杂条件下连拱隧道信息化施工及数值模拟研究[M]. 湘潭: 湖南科技大学, 2008. (HUANG Sheng-ping. Study on information construction and numerical simulation for multi-arch tunnel of complicated conditions in highway[M]. Xiangtan: Hunan University of Science and Technology, 2008. (in Chinese))
- [8] 吴波, 刘维宁. 城市浅埋隧道施工性态的时空效应分析[J]. 岩土工程学报, 2004, **26**(3): 340 - 343. (WU Bo, LIU Wei-ning. Analysis of space-time effect for urban shallow tunneling by excavation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, **26**(3): 340 - 343. (in Chinese))
- [9] 何川, 林刚. 公路双连拱隧道[M]. 北京: 人民交通出版社, 2006. (HE Chuan, LIN Gang. Double-arch tunnel in highway[M]. Beijing: China Communications Press, 2006. (in Chinese))
- [10] 祝玉学. 边坡可靠性分析[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1993. (ZHU Yu-xue. Analysis of slope stability[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1993. (in Chinese))