

文章编号: 1000-7598 (2011)增刊 2-0615-06

# 深隧道围岩稳定性的数值模拟与模型试验研究

陈 浩<sup>1</sup>, 任伟中<sup>1</sup>, 李 丹<sup>2</sup>, 夏彬伟<sup>3</sup>

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071;

2. 武汉科技大学 城市学院, 武汉 430065; 3. 重庆大学 西南资源开发及环境灾害控制工程教育部重点实验室, 重庆 400030)

**摘 要:** 在大型真三轴模型试验机上进行隧道的超载试验, 试验过程中采用内窥摄影实时监测试件的破坏演化全过程, 确定了高应力条件下隧道的变形特征和裂纹演化特征; 采用应变测量技术对隧道关键部位的应变值进行了测量, 据此分析了围岩体的应力变化规律。针对相似材料的力学特性, 建立了应变软化模型, 采用与模型试验相同的边界条件进行了数值模拟分析, 对围岩体的塑性应变变化过程和应力场进行了研究。结果表明, 两种手段反映的破坏演化过程是基本吻合的, 所反映的围岩体应力变化规律也是一致的。

**关 键 词:** 深隧道; 物理模型试验; 超载; 数值模拟; 破坏过程

中图分类号: U 451.1+2

文献标识码: A

## Numerical simulation and model test study of stability of surrounding rock for deep tunnel

CHEN Hao<sup>1</sup>, REN Wei-zhong<sup>1</sup>, LI Dan<sup>2</sup>, XIA Bin-wei<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. College of Urban Construction, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430065, China; 3. China Education Ministry's Key Lab. for Exploitation of Southwest Resources and Environmental Disaster Control Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

**Abstract:** The physical model test of a tunnel is made on the triaxial model-test machine. The whole failure process is observed by applying full inner-spy photograph technology; with it the deformation and crack extension of key parts are studied. By using the strain measure technology, the strains of key parts of the surrounding rock are measured; according to this, the variability of the stresses of surrounding rock is studied. The measured values of the main physical and mechanical indices of the model material are closed to the theoretical values. Based on the mechanical property of the model material, the Mohr-Coulomb criterion with tension cut-off strain-softening model is established. The numerical simulation are worked with the same boundary condition as the model test; according to this, the plastic zone and the stress field of the surrounding rock are studied. We compare the failure process and the variation of stress of the surrounding rock of the model test with the numerical simulation and draw the conclusion that the two processes coincide with each other.

**Key words:** deep tunnel; physical model test; overload; numerical simulation; failure process

## 1 引 言

随着我国隧道建设逐渐向着“长、大、深、群”的方向发展, 关于隧道围岩稳定性的研究越来越受到人们的重视, 许多学者对其进行了一系列的研究, 其中大多数研究是通过数值模拟或现场量测进行的<sup>[1-13]</sup>。物理模拟试验可以全面而又形象地呈现工程结构与相关岩土体共同作用下的应力和变形破坏

机制、形态以及失稳阶段的全貌, 可以得到许多数值模拟无法得到的直观认识, 研究此过程的演化规律对于认识围岩实际的变形破坏过程, 预测其动态演化规律极有意义。

本文以共和隧道为工程背景, 分别采用物理模型试验和数值模拟手段, 对围岩体破坏演化过程和应力变化规律进行了研究, 从而为指导隧道的设计和施工提供了有效的依据。

收稿日期: 2010-12-16

基金项目: 国家自然科学基金资助 (No. 40772186, No. 51008298); 岩土力学与工程国家重点实验室重点项目 (No. SKLZ08064); 国家科技支撑计划 (No. 2009BAK53B03)。

第一作者简介: 陈浩, 男, 1981 年生, 博士, 助理研究员。主要从事边坡和地下洞室方面的研究工作。E-mail: hchen@whrsm.ac.cn

## 2 工程概况

共和隧道为单向双洞隧道,左洞全长为 4 741 m,右洞全长为 4 770 m,两洞轴线相距 20~23 m,隧道最大埋深为 1 000 m。隧道断面形式为三心圆曲边墙结构,跨度为 12 m,高度为 9.5 m。隧道穿越地层为志留系上统罗惹坪组砂质页岩、页岩,局部夹粉砂岩。根据地应力测量资料可知,最大水平主应力与垂直应力量值相差不大,约为 20 MPa。

## 3 模型试验研究

### 3.1 试验概况

本次试验在岩土工程大型真三轴物理模型试验机上进行,综合考虑模拟范围及试验场地条件等因素,取几何相似常数  $C_l=200$ ,应力相似比  $C_\sigma=74$ ,重度相似系数  $C_\gamma=1.31$ 。模型尺寸为  $0.8\text{ m}\times 0.8\text{ m}\times 0.8\text{ m}$ ,由 2 层试件连接而成,两层试件的尺寸均为  $0.8\text{ m}\times 0.8\text{ m}\times 0.2\text{ m}$ ,另加设两片尺寸为  $0.78\text{ m}\times 0.78\text{ m}\times 0.20\text{ m}$  的砂浆垫片,分别置于两层模型的外侧。隧道跨度为 22 cm,高度为 17 cm。选用环氧树脂、聚酰胺、硅橡胶、硅橡胶固化剂、砂、重晶石粉和汽油的某种配比作为岩类的相似材料。经试验验证,所选取的相似材料基本满足了相似设计的要求(见表 1)。

表 1 相似材料的物理力学参数  
Table 1 Physico-mechanical parameters of the similar material

取值类型	弹性模量 $E/\text{MPa}$	抗压强度 $R_c/\text{MPa}$	重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	泊松比 $\mu$
理论值	313.78	0.677	21	0.350
实测值	310.00	0.684	21	0.331

试验过程中,在孔内放置针孔摄影机进行实时内窥摄影,在拱腰、拱肩和拱顶位置采用电阻应变片各布置 1 条测试线对围岩进行应变量测(见图 1)。在模型试件装入模型试验机(见图 2)样室后,即开始同步施加水平荷载和垂直荷载,水平荷载和垂直荷载之比为 1:1,施加荷载的速度为 30 kN/min,荷载级别为 100 kN,相当于实际工程中地应力水平,本次试验最终荷载为 200 kN。

### 3.2 变形破坏过程

根据试验过程中内窥摄影所观察到的变形破坏过程可知,围岩不同的部位表现出不同的变形特征,差异显著。最开始出现变形的是围岩的拱脚部位。当荷载加到 50 kN 时,拱脚部位出现长度很短且没有贯通的裂缝,随后拱肩部位局部有碎屑掉落,其

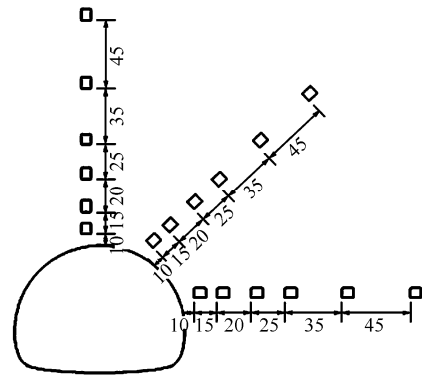


图 1 测试线布置(单位: mm)

Fig.1 Monitoring lines(unit: mm)



图 2 试验机

Fig.2 Testing machine

余部位在此时均无变形迹象,然后,围岩进入相对稳定期。当荷载施加到 110 kN 时,原来的破坏裂纹在此时快速扩张,拱肩开始出现掉块。继续加载后在极短的加载区间内破坏裂纹扩展到整个洞室内壁轮廓,不时有较大的碎屑、碎块垮落或弹出。洞室的破坏加载区间越来越小,而破坏速度越来越快。当荷载施加到 180 kN 时,裂纹在壁面快速扩张并伴随剥离现象,内敛发生严重,压碎掉渣,成层脱层。荷载施加到 200 kN 时,洞室完全破坏,试验机已无法给试件加力,并且出现荷载下降的现象。由整个变形破坏过程可知,破坏是一个渐进过程,是非连续的,具有间歇性、阶段突发性。洞室的破坏主要是破裂区的形成和扩大导致的。由破坏后的洞室(见图 3)形状可见,洞壁以拱肩的坍塌为主,且在拱脚处存在明显的裂纹,自拱脚以大约 45°向斜下方发展至模型边界,掉落的碎块(见图 4)呈明显的剪切破坏特征。

可见在高应力环境下,相当一部分围岩处于峰后应力状态,根据岩体全应力-应变规律曲线,岩体在达到极限强度后,其变形进入塑性软化阶段,该阶段岩体塑性软化强度随应变的增大而逐渐衰减至残余强度;对于地下洞室围岩,由于洞周二次应力的重分布造成应力集中,围岩受到的应力超过其强

度，进入塑性状态，并形成潜在的塑性滑动面，在这些潜在的塑性滑动面和某些原有的软弱结构面上，剪应力达到或超过其抗剪强度，因而形成剪切滑移破坏，已破坏的岩体塑性软化强度同岩体残余强度相等，塑性区分为残余强度区和应变软化区，当围岩塑性应力对应的变形达到破裂条件时，就形成了破裂区，破裂区的形成和扩大最终导致了洞室的破坏。



图3 破坏后试件  
Fig.3 Broken specimen



图4 碎块  
Fig.4 Fragment

### 3.3 应力测试结果

根据试验过程中每步荷载时所测得的各测试线上测试点的径向应变值  $\epsilon_r$  和切向应变值  $\epsilon_\theta$  计算出各测点的径向应力  $\sigma_r$  和切向应力  $\sigma_\theta$ 。对各部位的测试线，作出其在加载初期(40 kN)、中期(100 kN)、后期(200 kN) 3 级荷载下的径向和切向应力曲线如图 5 所示(图中  $d$  为距洞壁距离， $r$  为洞半径)。

由测试结果可知：围岩体不同部位各测试点上的径向和切向应力都是随着荷载的增加而增加的。在同级荷载下，径向应力随着距洞壁距离的增大而增大；切向应力在洞壁附近处应力集中，过了峰值点后离洞壁的距离增大应力随之降低，最后趋于稳定。在加载初期荷载较低时，切向应力在洞壁处应力集中，随着荷载的增大，应力峰值点后移，说明洞壁到峰值点范围内围岩开始由弹性状态进入塑性

状态，过了峰值点后离洞壁的距离增大，应力随之降低，最后趋于稳定。

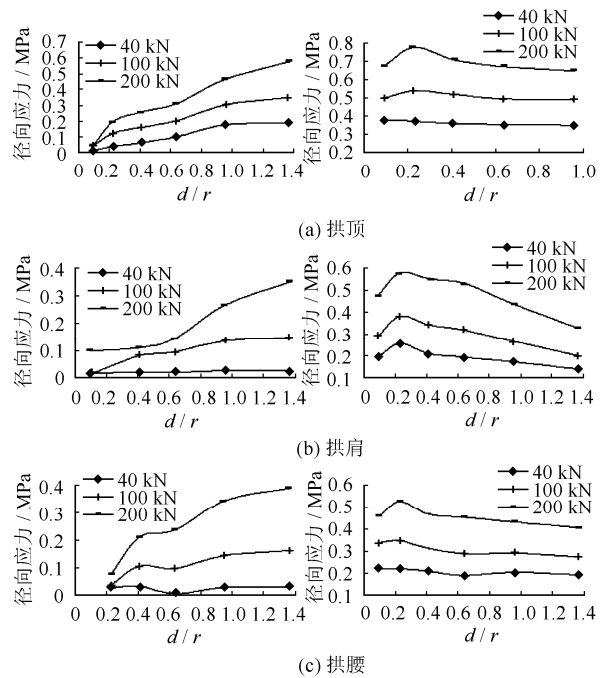


图5 不同荷载条件下径向应力和切向应力的比较  
Fig.5 Comparisons of stress under different loading conditions

以拱顶测试结果为例，在加载初期(40 kN)，由于荷载较小，围岩不产生屈服和破坏，围岩处于弹性状态。切向应力在洞壁处集中，距洞壁最近测点应力最大，为 0.18 MPa，随着离洞壁距离的增大逐渐减小，距洞壁最远处测点应力最小，为 0.14 MPa。径向应力则距洞壁最近，测点应力为 0.01 MPa，随着距洞壁距离的增大而增加，距洞壁最远处，测点应力为 0.13 MPa；在加载中期(100 kN)，距洞壁最近测点切向应力大小为 0.3 MPa，距洞壁 0.227r 处，测点应力最大，为 0.342 MPa，随着离洞壁距离的增大切向应力逐渐减小，距洞壁最远处测点应力最小，为 0.285 MPa。可见在围岩受到的应力超过其强度后，岩体屈服进入塑性状态，塑性区的出现使应力集中区向围岩体内偏移，故应力峰值点向围岩体内偏移。该阶段岩体塑性软化强度随应变的增大而逐渐衰减至残余强度。

## 4 数值模拟研究

### 4.1 计算模型的选取

在高地应力环境下，相当一部分围岩处于峰后应力状态，根据岩体全应力-应变规律曲线，岩体在达到极限强度后，其变形进入塑性软化阶段，该阶段岩体塑性软化强度随应变的增大而逐渐衰减至残

余强度。因此；在数值模拟时选用应变软化模型。

### 4.2 计算参数的选取

相似材料不同于普通的岩石材料，由于其试件强度较低，很少有比较精确的仪器测量相似材料的摩擦角、黏聚力、剪胀角、抗拉强度等参数，这些参数与塑性应变的函数关系更难通过现有的仪器得到。为确定合理的围岩力学参数，利用相似材料试验室测试基本参数为数值模型初始计算参数，进行了围岩力学参数反演分析，经过多次反算，确定了上述各参数与塑性应变的关系。用这种参数组合计算得到的应力-应变曲线与在岩石压力机上测试出来的相似材料模型试件的应力-应变关系曲线比较吻合（见图 6）。

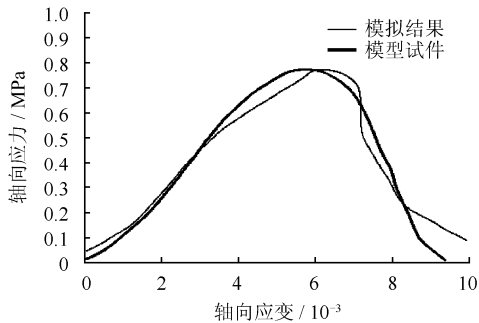


图 6 应力-应变计算曲线与实测比较

Fig.6 Comparisons between test and numerical simulation in aspects of stress-strain curves

### 4.3 模型的建立和边界条件的施加

数值计算模型的尺寸和物理模型一致，为 0.8 m×0.8 m×0.2 m，施加的边界条件与模型试验相符，与模型试验的加载对应，荷载大小取 0.1~0.7 MPa，其中 0.3 MPa 约相当于模型试验中 100 kN 的荷载（面积为 0.32 m<sup>2</sup>，应力为 0.313 MPa）。

### 4.4 变形破坏过程

对于隧道工程，在数值模拟中，等效塑性应变贯通全断面时围岩并没有达到破坏状态，同等条件下围岩质量越好，达到破坏状态时围岩的塑性区范围越大，破坏区也越小，因而，不能仅凭塑性区范围大小来确定围岩稳定性，而是在围岩塑性区中塑性应变发展到一定程度时，才在围岩中形成潜在的破坏面，围岩达到破坏状态。因此，采用塑性应变产生突变作为隧道失去稳定的判据是合理的<sup>[14]</sup>，下面将从这个角度出发对隧道的破坏过程进行分析。3 种荷载级别的应变增长云图如图 7 所示。

在荷载级别为 60 kN 时，拱脚部位可见明显的剪应变集中，与模型试验在这一加载级别时拱脚出现裂纹是相符合的；在荷载级别为 120 kN 时，除拱

脚处应变较大外，洞壁周围应变值也较深部要大，而模型试验在此加载级别时的特征是破坏裂纹快速扩展到整个洞壁轮廓；在荷载级别为 160 kN 时，可见明显的应变沿洞壁轮廓往深部发展，特别是拱肩和拱脚部位可见明显的应变往深部发展，模型试验在该荷载级别已开始掉块，成层脱层。由此可见，数值模拟所反映的破坏演化过程以及破坏区域和模型试验是基本吻合的，只是数值模型产生破坏时的荷载水平要略高于模型试验，因为模型试验由于制作工艺的原因，很难保证材料的均质性，导致不同部位材料性质会有差异，故产生破坏时荷载会低于数值模拟。

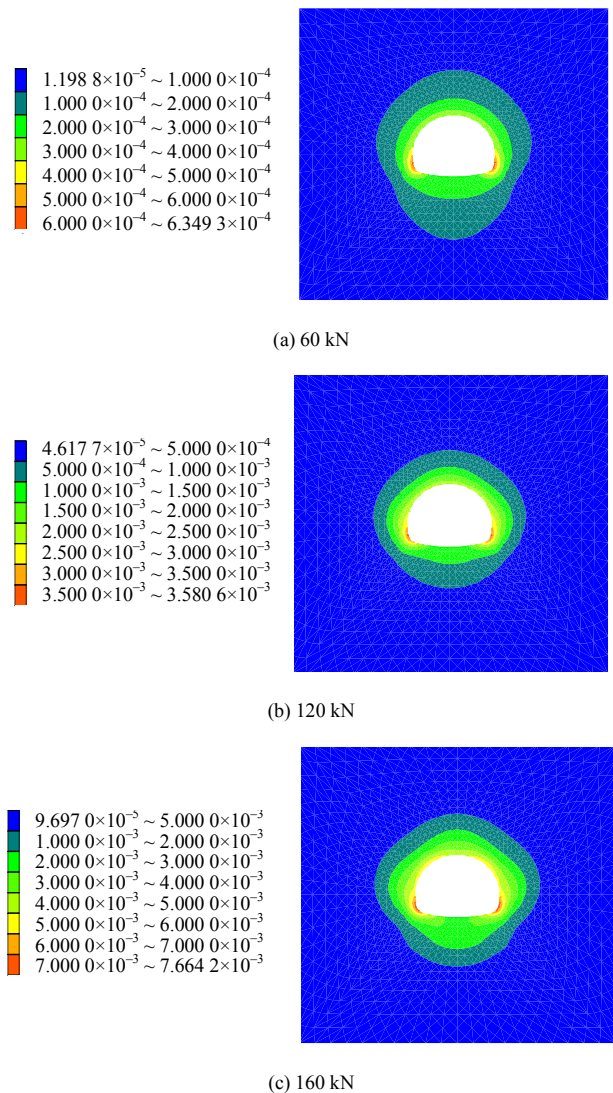


图 7 应变增长云图

Fig.7 Nephograms of shear strain increment

### 4.5 围岩体应力分布

根据应力计算结果（见图 8）以拱顶处在各级荷载下的应力值（见图 9）为例对围岩体的应力分布进行分析。

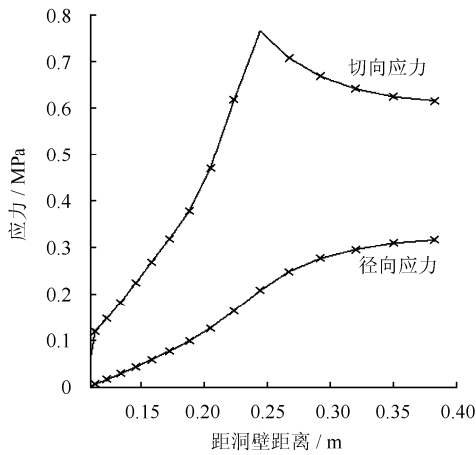
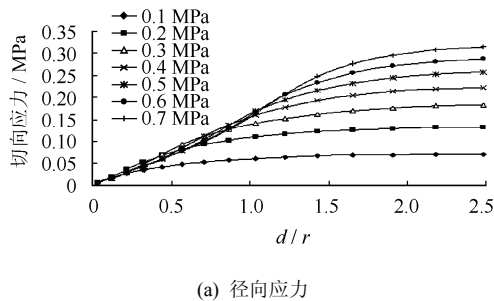
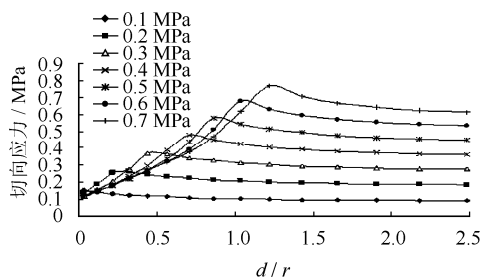


图 8 径向应力和切向应力  
Fig.8 Radial stress and tangential stress



(a) 径向应力



(b) 切向应力

图 9 不同荷载条件下径向应力和切向应力的比较  
Fig.9 Comparisons of stress under different loading conditions

由计算结果可知，模型试验和数值模拟得到的应力场基本一致。由于试件制作工艺和监测手段的问题，在量值上略有差别，但反映的规律是一致的。

径向应力随着距洞壁距离的增大而增加，逐渐过渡到初始应力状态。切向应力在洞壁附近处集中，过了峰值点后随着距洞壁距离的增加而减小，逐渐过渡到初始应力状态。且荷载级别越大，塑性区范围越大，应力峰值点距洞壁距离也越远。

以拱顶测线为例，在加载初期，围岩还处于弹性状态时，切向应力在洞壁处集中，在荷载级别为 0.3 MPa 时，应力峰值点位于距洞壁 0.439r 处测点，其大小为 0.37 MPa，过了该测点后应力随着离洞壁距离的增加而降低，距洞壁最远的测点 (2.483r)

应力大小为 0.276 MPa；当荷载级别为 0.7 MPa 时，该测点 (0.439r) 处于峰后应力状态，其应力降为 0.27 MPa，峰值点后移，位于距洞壁 1.222r 处，其应力大小为 0.766 MPa，然后，随着离洞壁距离的增加而降低，距洞壁最远的测点 (2.483r) 应力大小为 0.615 MPa。塑性区内测点在荷载增加后切向应力开始下降，是因为临近洞壁范围的岩体在荷载级别较高时处于高应力和低围压的状态，相当一部分围岩处于峰后应力状态，在达到极限强度后，其变形进入塑性软化阶段，该阶段岩体应变增大的同时软化程度加剧，逐渐会降低至残余强度，故应力是逐渐降低的。模型试验中由于测点数量有限，并未能反映出这一规律。

### 5 结 论

(1) 所研制的相似材料主要物理力学指标的理论值和实测值较为接近，性能稳定，试验重复性好；加载设备大型真三轴模型试验机 3 个方向上均能通过轴向加载系统独立加压，自动化控制，并能实时采集数据。试验条件能较好地满足大型模型试验的需要。

(2) 采用内窥摄影进行全过程实时观测可知，破坏是一个渐进过程，是非连续的，具有间歇性、阶段突发性，初始的裂纹产生是后期急剧破坏的前提，整个破坏过程为：局部产生裂纹——裂纹扩展——裂纹急剧贯通——破坏；不同的部位表现出不同的变形特征，差异显著。试验结果为实际工程中支护方案的设计提供了一定的理论依据。

(3) 围岩体应力场变化规律为径向应力随着距洞壁距离的增大而增大；切向应力在加载初期荷载较低时在洞壁处应力集中，随着荷载的增大应力峰值点后移，过了峰值点后离洞壁的距离增大应力随之降低，最后趋于稳定。

(4) 数值模拟结果和模型试验结果具有良好的一致性，作为物理模型试验的有益补充，弥补了模型试验无法实现全场的定量监测这一缺憾，进一步得到了围岩体在进入塑性软化阶段后的应力变化规律。

### 参 考 文 献

[1] 陈广洲, 徐晓春, 汪家权, 等. 基于投影寻踪插值模型的围岩稳定性分类研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(6): 1897-1901.  
CHEN Guang-zhou, XU Xiao-chun, WANG Jia-quan, et al. Classification of surrounding rock stabilities based

- on projection pursuit interpolation model[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(6): 1897—1901.
- [2] 李宁, 朱才辉, 姚显春, 等. 一种浅埋松散围岩稳定性离散化有限元分析方法探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(2): 3533—3542.  
LI Ning, ZHU Cai-hui, YAO Xian-chun, et al. Stability analysis of loose surrounding rock with shallow overburden by a discretization finite element method[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 28(2): 3533—3542.
- [3] 贾磊, 欧尔峰, 章岩. 隧道围岩稳定性的模糊评价研究[J]. 兰州交通大学学报, 2010, 29(3): 25—28.  
JIA Lei, OU Er-feng, ZHANG Yan. Study on the fuzzy evaluation of the stability of tunnel surrounding rock[J]. **Journal of Lanzhou Jiaotong University**, 2010, 29(3): 25—28.
- [4] 张延新, 蔡美峰, 乔兰, 等. 高速公路隧道开挖与支护力学行为研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(6): 1284—1289.  
ZHANG Yan-xin, CAI Mei-feng, QIAO Lan, et al. Study on mechanical response to excavation and support of expressway tunnel[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(6): 1284—1289.
- [5] 赵瑜, 李晓红, 顾义磊, 等. 高应力区隧道围岩变形破坏的数值模拟及物理模拟研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(增刊): 393—397.  
ZHAO Yu, LI Xiao-hong, GU Yi-lei, et al. Numerical simulation on deformation and failure of surrounding rock in high in-situ stress and its verification in physical model[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(Supp.): 393—397.
- [6] 柳群义, 朱自强, 钟正强, 等. 基于 Hoek-Brown 准则的隧道围岩屈服接近度分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(8): 2447—2571.  
LIU Qun-yi, ZHU Zi-qiang, ZHONG Zheng-qiang, et al. Yielding approach index for surrounding rock mass of tunnel based on Hoek-Brown criterion[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(8): 2447—2571.
- [7] 贾蓬, 唐春安, 杨天鸿, 等. 强度折减法在岩石隧道稳定性研究中的应用[J]. 力学与实践, 2007, 29(3): 50—55.  
JIA Peng, TANG Chun-an, YANG Tian-hong, et al. Application of strength reduction method on the stability study of rock tunnel[J]. **Mechanics and Engineering**, 2007, 29(3): 50—55.
- [8] 唐春安, 李连崇, 李常文, 等. 岩土工程稳定性分析 RFPA 强度折减法[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(8): 1522—1530.  
TANG Chun-an, LI Lian-chong, LI Chang-wen, et al. RFPA strength reduction method for stability analysis of geotechnical engineering[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(8): 1522—1530.
- [9] 张召千, 徐明德, 刘泉声. 煤巷围岩稳定性加权平均评价方法研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(11): 3464—3468.  
ZHANG Zhao-qian, XU Ming-de, LIU Quan-sheng. The research on the methodology of weighted average evaluation for surrounding rock stability of tunnel[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(11): 3464—3468.
- [10] 谷栓成, 姚国圣, 刘娟, 等. 锚杆在软岩中作用机理的研究[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2005, 24(41): 74—76.  
GU Shuan-cheng, YAO Guo-sheng, LIU Juan, et al. A study on the acting mechanism of bolts in soft rock[J]. **Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science)**, 2005, 24(41): 74—76.
- [11] 李晓静, 杨为民, 朱维申. 软岩围岩稳定性及加固数值分析[J]. 山东交通学院学报, 2003, 4: 19—22.  
LI Xiao-jing, YANG Wei-ming, ZHU Wei-shen. Numerical analysis on stability of soft rock and surrounding rock and reinforcement[J]. **Journal of Shandong Jiaotong University**, 2003, 4: 19—22.
- [12] 方勇, 何川. 全长黏结式锚杆与隧道围岩相互作用研究[J]. 工程力学, 2007, 24(6): 111—116.  
FANG Yong, HE Chuan. Study on the interaction of whole bonded rock bolt and tunnel surrounding rock[J]. **Engineering Mechanics**, 2007, 24(6): 111—116.
- [13] 汪明武, 李丽, 金菊良. 围岩稳定性集对分析-可变模糊集综合评价模型[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(6): 941—944.  
WANG Ming-wu, LI Li, JIN Ju-liang. Set pair analysis-variable fuzzy set model for evaluation of stability of surrounding rock[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2008, 30(6): 941—944.
- [14] 张黎明, 郑颖人, 王在泉, 等. 有限元强度折减法在公路隧道中的应用探讨[J]. 岩土力学, 2007, 28(1): 97—101, 106.  
ZHANG Li-ming, ZHENG Ying-ren, WANG Zai-quan, et al. Application of strength reduction finite element method to road tunnels[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(1): 97—101, 106.