

# 软岩隧道围岩加固方法优化对比试验研究与分析

李 丹<sup>1,2</sup>, 白世伟<sup>2</sup>, 陈陆望<sup>3</sup>, 陈 浩<sup>2</sup>, 赵 瑜<sup>4</sup>

(1. 武汉科技大学 城市建设学院, 武汉 430065; 2. 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;  
3. 合肥工业大学 资源与环境工程学院, 合肥 230009; 4. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 4300030)

**摘 要:** 为解决软岩隧道工程的支护优化设计问题, 研制出力学曲线与原岩相似的模型材料, 形成软岩工程常用的支护设计方法对应的物理模型, 即锚杆支护、锚喷支护、锚杆加长的锚喷支护, 加上毛洞模型作为参考模型, 4 种平面模型形成三维模型后, 置入大型真三轴模型试验机, 在模型边界相同的条件下对软岩隧道的支护方法进行研究。试验结果表明: 不同的支护方式具有不同的超载能力和不同的破坏特点; 该相似模型材料对软岩大变形特点具有良好的适用性。试验还为软岩隧道支护设计提供了可靠的研究基础。

**关 键 词:** 软岩 支护优化设计; 大型真三轴物理模型试验机; 锚杆; 锚喷

中图分类号: U 456

文献标识码: A

## Research and analysis of comparative tests of optimization of methods for reinforcing soft surrounding rock of tunnel

LI Dan<sup>1,2</sup>, BAI Shi-wei<sup>2</sup>, CHEN Lu-wang<sup>3</sup>, CHEN Hao<sup>2</sup>, ZHAO Yu<sup>4</sup>

(1. College of Urban Construction, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430065, China; 2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 3. School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 4. College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of optimum supporting design of tunnel engineering with soft surrounding rock, a similar material of model of which the mechanical curve is similar to the original rock is developed. The physical models corresponding with the cases which are usually used in soft rock engineering such as bolt supporting case, bolt and jetting supporting case, lengthed bolt and jetting supporting case, are made. As well as the bare tunnel case, the four models form a 3D model and are put into the large scale real triaxial physical model machine. So the research on supporting design of soft rock tunnel is base on the same boundary condition of model. The test results demonstrate that various supporting methods lead to various over loaded abilities and various failure character. The similar material is fit for the trait of large deformation of soft rock. The research provides reliable foundation for supporting design of soft rock tunnel as well.

**Key words:** soft rock; optimizing supporting design; real triaxial testing machine; bolt; bolt and jetting

## 1 引 言

软岩在我国具有非常广泛的分布<sup>[1]</sup>。软岩中隧道围岩稳定性问题一直是岩土工程的一个重要研究内容。近年来, 得益于一些软岩隧道工程的兴建, 对软岩隧道稳定性及其加固方法的研究获得了一些进展<sup>[2~6]</sup>, 但由于软岩的大变形特点与硬岩差别较大, 使得软岩隧道围岩变形机制研究与支护设计方法距离实际应用还有一定差距。伴随着相似理论几个世纪的发展和完善, 地下洞室模型试验方法也得

到发展<sup>[7]</sup>。由于模型试验可以在变形机制研究尚不明朗的情况下, 避开“描述机制”的尴尬而直接利用物理实体的“内置的”机制“自觉地”生成试验过程和结果<sup>[8]</sup>, 因此, 岩石力学模型试验在科学研究和解决工程实际问题方面具有独特的优势。特别是交通、水电等工程中一些地下洞室的规模越来越大, 一些学者转而采用物理模型试验方法来获取工程问题的解答<sup>[9~12]</sup>。锚喷加固作为软岩隧道围岩最常用最有效的方法之一, 其设计理论尚不完善。本文针对工程背景中存在的按工程分类定义的软岩, 即流变性

收稿日期: 2010-01-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 50334060); 岩土力学与工程国家重点实验室资助课题 (No. Z110806)。

第一作者简介: 李丹, 男, 1970 年生, 博士, 讲师, 主要从事地下空间及其结构稳定性的理论与试验研究。E-mail: Danlisuc@163.com

不明显、强度不高的软岩，采用自主研发的环氧硅橡胶系模型材料，制成几何相似比和弹性模量相似比相近的4种对比模型，即毛洞、锚杆、锚喷、加长锚杆与喷层支护对比的平面模型，并组成三维模型，置入大型真三轴模型试验机中，通过在各工况中形成相同的边界条件，从而对多种加固方案下软岩围岩稳定性进行试验研究，并得出有益的结论。

## 2 工程背景与相似模型材料的选取

### 2.1 工程背景

本试验的工程背景为渝长(沙)高速公路中的共和隧道。隧道全长4 770 m，最大埋深为1 200 m。隧道截面为三星拱形，洞宽12 m，高9.4 m。净空断面积约为64.25 m<sup>2</sup>，属深埋大断面隧道。隧道现场远景图见图1。



图1 隧道远景图

Fig.1 Perspective of tunnel

在隧道埋深小于400 m段，围岩岩性为志留系上统罗惹坪组泥质页岩、页岩、局部夹粉砂岩。单斜构造，岩层产状315°~335°∠35°~40°，岩层层理较发育，强风化带较厚，单轴抗压强度为6~25 MPa，岩体完整性系数 $K_V=0.55\sim 0.8$ ，地下水不发育。根据规范和软岩按工程分类的定义，隧道围岩为软岩<sup>[13]</sup>。为探究隧道在该段的支护方案优化和围岩稳定性评判，采用多工况的物理模型试验方法进行研究。

### 2.2 相似模型材料的选取

为模拟隧道软岩，研制成采用环氧树脂与聚酰胺、硅橡胶与相应固化剂等作为粘合剂，以重晶石及细砂为骨料，汽油为溶剂的模型材料。除了力学参数满足相似关系外，本文还考虑相似材料同隧道围岩应力-应变全过程曲线的相似性。岩样的单轴压缩应力-应变全过程曲线见图2(a)，为此选取的相似材料，其单轴压缩应力-应变全过程曲线如图2(b)所示。对比2组曲线，其峰前、峰值屈服段均较为接近。模型材料须满足相似判据 $I=C_E/(C_L C_\gamma)=1$ ，其中 $C_E$ 、 $C_L$ 、 $C_\gamma$ 分别为原型与模型材料弹性模量、

几何尺寸、重度的相似比，模型几何相似比取为50。该相似模型材料与原岩的力学参数对比见表1。表1中力学参数的相似，表明物理模型在试验中的应力-应变过程是相似的，这一相似材料基本上能够模拟软岩围岩的塑性破坏特征。

表1 相似材料及其原型材料力学参数

Table 1 Mechanical parameters of the similar material and the prototype material

材料	弹性模量 $E$ /MPa	抗压强度 $R_c$ /MPa	重度 /(kN/m <sup>3</sup> )	泊松比 $\mu$
原岩	7 140	22.1	27.5	0.35
模型材料	110	0.45	21.0	0.33

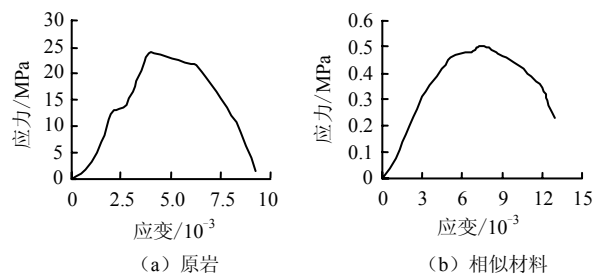


图2 原岩与相似材料力学曲线对比

Fig.2 Contrast of mechanical curve on original rock and similar material

## 3 试验方案

### 3.1 工况模拟

对于隧道工程的不同埋深段，拟采用不同支护方案。对应各支护方案，模型试验设计以下工况：工况1，毛洞模型，用于支护模型的参照。工况2，一般长度锚杆模型，即拱腰处锚杆模拟实际长度为3.0 m，拱腰以上锚杆长度模拟4.5 m。工况3，一般长度锚杆加内衬模型，其锚杆长度及布置同工况2，内衬设置为隧道两拱脚以上，模拟30 cm厚的内衬设计。工况4，加长锚杆加内衬模型，将工况3中的锚杆模拟长度分别加至5.0 m和6.0 m，其余参数不变。

在工况2~4中，锚杆布置参照隧道支护设计布置，自隧道竖向对称轴左右各55°范围内布置长锚杆，55°~90°范围内布置短锚杆，每个模型中布置9层锚杆，模拟锚杆层间距为1.2 m，相邻2层梅花形布置，层内锚杆间距按布置角为10度/根布置。在带喷层模型中设衬砌。选用石膏、重晶石、砂、水拌匀后制作。布置区段为拱脚—拱顶—拱脚断面，厚度为6 mm，中间放置细铁丝网一层，模拟衬砌配筋。

### 3.2 监测方法

试件围岩的应变测量主要采用BQ-4BA型电

阻应变计。测量部位选择拱顶、拱腰与拱脚。各应变片通道集中后进入 DH3815N 静态应变测试系统，并用同样的模型材料接入补偿片。

在模型加载时，模型隧道洞以 BT-688 型针孔摄影机进行实时内窥，并通过数据采集卡将图形信号进行数据转换，最终通过计算机监控洞室内的实时反应。

### 3.3 试验加载

物理模型试验机主要由主机、液压装置、试件室、计算机数据采集与控制系统和试验辅助装置等几个部分组成，采用电液伺服控制。

该物理模型试验机的左、右、上、下、后 5 面各 2 个共 10 个规格相同的油压千斤顶，每个油压千斤顶均装有独立的伺服阀和数据采集器，是三向加载电液伺服真三轴模型试验机。

本次试验模拟对象的地应力水平约 10 MPa，岩体竖向地应力与水平地应力之比接近 1。按应力相似比，确定模型边界应力为 0.16 MPa，换算试验机加载为 102 kN。

## 4 试验结果及分析

由 3.1 中的 4 个工况分别制作的 4 个 20 cm 厚的平面模型组合成三维模型，在三向加载条件下进行试验，并对毛洞层、锚杆层、一般锚喷层围岩进行了监测。

### 4.1 毛洞层、锚杆层、一般锚喷层支护模型试验

试验在毛洞层、锚杆层、一般锚喷层支护模型上设置了应变片。应变片分布主要保证锚杆长度范围的围岩应变测试，并适当延伸至 1 倍洞半径外。3 层模型在拱顶、拱腰部的径向、切向应力结果如图 3 所示。

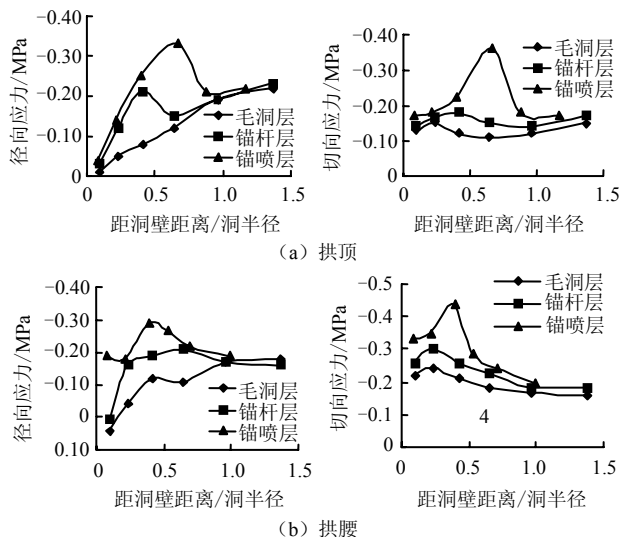


图 3 毛洞与锚杆支护洞室应力对比图

Fig.3 Stress contrast of bare tunnel and supported tunnel

## 4.2 围岩稳定性试验结果

试验加载至一般锚喷层破坏时结束。之后取出模型，各工况下模型破坏状态见图 4~7。

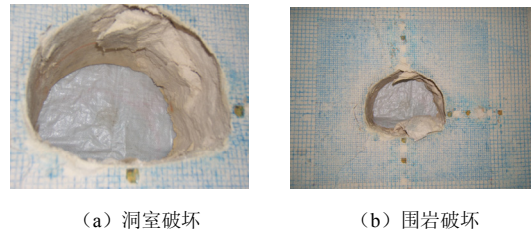


图 4 毛洞层破坏形态  
Fig.4 Failure modality of bare tunnel

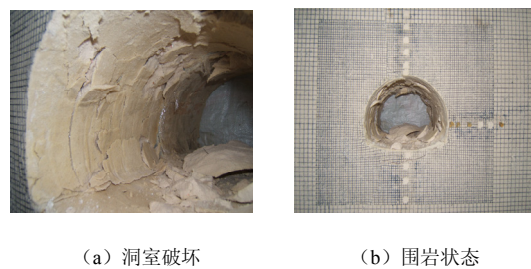


图 5 一般锚杆层破坏形态  
Fig.5 Failure modality of bolt reinforcing tunnel

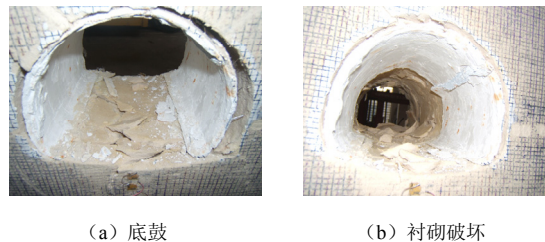


图 6 一般锚喷层破坏形态  
Fig.6 Failure modality of bolt and jetting reinforcing tunnel



图 7 加长锚喷层试验后形态  
Fig.7 Failure modality of lengthened bolt and jetting reinforcing tunnel

## 4.3 试验结果分析

从应力结果看，毛洞的围岩应力分布规律与均质硬岩的分布规律较为一致<sup>[14]</sup>。在锚杆加固后，锚

杆范围内围岩的径向和切向应力得到提高,除拱腰径向应力峰值不太明显外,其余部位均在锚杆区域出现明显峰值点,说明锚杆提高了围岩加固区的三向压应力水平,从而提高了围岩稳定性。在一般锚喷层中,喷层对锚杆加固区围岩的三向压应力水平进一步提高,使围岩径向和切向应力峰值向围岩深部转移。

结合内窥摄影和洞室破坏形态看,毛洞层先在拱腰-拱脚段出现大块破裂,随着边界荷载增加,拱顶出现垮塌,洞壁破坏深度按相似关系(下同)约为0.8~1.3 m。拱底基本无破坏。锚杆加固后,洞壁稳定性提高,基本未出现大垮塌现象。破坏先从拱脚开始,拱腰以上裂缝间围岩小块垮落,拱底在围岩约1.2 m深处出现V形破裂面,并在两拱脚处出露。一般锚喷层围岩完整,衬砌破坏,在拱脚处产生大位移,促使衬砌在拱肩处弯折破坏,继而在拱底中间产生沿隧道轴向的齿状折线形底鼓破坏,而被衬砌支护的洞壁基本无破坏。衬砌破坏时在拱顶、拱脚处向洞室位移约分别为20 cm和45 cm。加长锚喷层只在拱脚处出现衬砌的较小位移,洞壁及围岩则基本无破坏。

综合应力分布和洞室破坏结果,锚杆加固提高了围岩压应力水平。喷层支护使拱顶围岩压应力峰值进一步提高并向深部移动,而在拱腰处,径向压应力大幅提高,从破坏形态分析可知,加强衬砌在拱脚处的抗侧移强度将是衬砌发挥更大加固作用的有效途径。

## 5 结 论

(1) 以汽油为溶剂、环氧系与硅橡胶系共同作为粘结剂,砂与重晶石为骨料的新型相似材料可以满足模拟软岩隧道围岩大变形特点的要求。

(2) 大型真三轴模型试验机适用模型尺寸大,电液伺服加载精细,数字化控制及数据实时快速采集系统为多工况大型模型组合试验提供了可能。

(3) 从各支护层进入初始破坏的加载水平看,对软岩围岩支护强度依次增大的是:锚杆支护、锚喷支护、加长锚杆的锚喷支护。但在初始破坏之后,各支护方式的破坏特点有所不同。

(4) 在软岩岩体静水地应力的条件下,锚杆加固提高了围岩的三向压应力水平。喷层支护使围岩三向压应力峰值进一步提高并向深部移动。特别是在拱腰处,洞壁浅部围岩的径向压应力在锚杆加固层的应力水平基础上大幅提高,该支护反力直接导致衬砌破坏,因此加强衬砌在拱腰至拱脚处的抗侧

移强度将有利于衬砌发挥更大加固作用。

本次试验属于先开挖后加载的平面应变模型试验,这与隧道开挖时围岩的真实应力路径尚存在差异,因而有待于试验方法的进一步改进。

## 参 考 文 献

- [1] 孙钧. 岩土材料流变及其工程应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999.
- [2] 周春华, 郭喜峰, 周黎明, 等. 鄂西某隧道地应力场回归分析及其对工程稳定性影响[J]. 长江科学院院报, 2008, 25(5): 59-62.  
ZHOU Chun-hua, GUO Xi-feng, ZHOU Li-ming, et al. Geo-stress field regression analysis and its Influence on engineering stability of some tunnel in western Hubei province[J]. **Journal of Yangtze River Scientific Research Institute**, 2008, 25(5): 59-62.
- [3] 周太全, 华渊, 吕宝华. 金华山软岩铁路隧道施工过程围岩屈服接近度分析[J]. 工程地质学报, 2008, 16(4): 546-550.  
ZHOU Tai-hua, HUA Yuan, LV Bao-hua. Yield approach index analysis of soft and weak rock mass in Jinhushan railway tunnel during construction[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2008, 16(4): 546-550.
- [4] 郑俊杰, 刘秀敏, 欧阳院平, 等. 大断面隧道锚杆设置的优化分析[J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(2): 341-346.  
ZHENG Jun-jie, LIU Xiu-ming, OUYANG Yuan-ping, et al. Optimum analysis of large-section tunnel's bolts location by FLAC[J]. **Chinese Journal of Underground Space and Engineering**, 2009, 5(2): 341-346.
- [5] 罗清明, 李亮, 杨小礼. 软岩隧道的围岩变形计算[J]. 长沙铁道学院学报, 2003, 21(2): 14-18.  
LUO Qing-ming, LI Liang, YANG Xiao-li. The calculation of deformation of soft rock around tunnels[J]. **Journal of Changsha Railway University**, 2003, 21(2): 14-18.
- [6] 汪洋, 王晓睿, 唐雄俊, 等. 高地应力条件下软岩隧道大变形数值模拟[J]. 中外公路, 2009, 29(5): 200-203.
- [7] 曾亚武, 赵震英. 地下洞室模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(增刊): 1745-1749.  
ZENG Ya-wu, ZHAO Zhen-ying. Model testing studies of

- underground openings[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2001, 20(Supp.): 1745—1749.
- [8] 李丹. 高地应力条件下交通隧道的模型试验研究及数值模拟[博士学位论文 D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2008.
- [9] 李仲奎, 卢达溶, 中山元, 等. 三维模型试验新技术及其在大型地下洞群研究中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(9): 1430—1436.
- LI Zhong-kui, LU Da-rong, Nakayama H, Hosomi H et al. Development and application of new technology for 3D geo-mechanicals model test of large underground houses[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, 22(9): 1430—1436.
- [10] 陈浩, 杨春和, 李丹, 等. 软岩隧道锚杆支护作用的模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增刊 1): 2922—2927.
- CHEN Hao, YANG Chun-he, LI Dan, et al. Model test study on mechanism of bolt in soft rock tunnel[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 28(Supp.1): 2922—2927.
- [11] 刁心宏, 刘士雨, 官伟. 软岩隧道围岩压力模型试验研究[J]. 华东交通大学学报, 2008, 25(5): 1—7.
- DIAO Xin-hong, LIU Shi-yu, GUAN Wei. Research on model test of wall rock stress of tunnel in soft rock[J]. **Journal of East China Jiaotong University**, 2008, 25(5): 1—7.
- [12] 顾金才, 沈俊, 陈安敏, 等. 锚索预应力在岩体内引起的应变状态模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(增刊): 917—921.
- GU Jin-cai, SHEN Jun, CHEN An-min, et al. Model testing study of strain distribution regularity in rock mass caused by prestressed anchorage cable[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2000, 19(Supp.): 917—921.
- [13] 何满潮, 景海河, 孙晓明. 软岩工程力学[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [14] 李丹, 夏彬伟, 陈浩, 等. 深埋长隧锚杆对围岩支护效应的模型试验研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(7): 1832—1836.
- LI Dan, XIA Bin-wei, CHEN Hao, et al. Experimental research on supporting effect of bolts on surrounding rock in deeply buried long tunnel[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(7): 1832—1836.