

软岩硐室稳定性的复合结构柔性反底拱控制时效分析

刘传孝¹, 王 龙¹, 刘志浩¹, 黄东辰¹, 张秀丽²

(1. 山东农业大学水利土木工程学院, 山东 泰安 271018; 2. 中国科学院武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071)

摘 要: 地下工程的围岩为软岩或因赋存深度的增加而呈现软岩特征时, 其稳定性控制问题趋于突出, 而对软岩硐室底臌的有效控制是决定硐室整体稳定性、保障其服务年限的关键。设计应用于软岩硐室底臌控制的复合结构柔性反底拱, 探讨其作用机理, 其控制底臌的时间效应包括成拱初期的负底臌效应、吸收变形能为主要特征的柔性支护阶段和后期延长服务年限为目的的刚性支护阶段, 其中柔性支护作用保证了相对较长而且稳定的软岩硐室服务年限。经实践证明, 试验条件下的负底臌效应历时 63 d, 柔性结构控制底臌的作用时间为 158 d, 反底拱刚性结构对底臌的控制可以延长巷道的服务年限 140 d, 即巷道在 1 a 内无需底板修复。复合结构柔性反底拱的底臌控制效果明显, 但是硐室整体稳定性并非单一依赖于对底臌的控制, 支护体系在边界上存在相对薄弱的环节等因素, 依然可转化为软岩硐室整体破坏的主要原因。

关键词: 时效; 复合结构柔性反底拱; 底臌; 刚性结构; 软岩

中图分类号: TD353

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2012)08-1464-05

作者简介: 刘传孝(1970-), 男, 山东郯城人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事非线性动力学、计算力学、岩土力学与工程方向的研究与教学工作。E-mail: Lchuanx@163.com。

Time effects of flexible inverted arch with composite structures to control stability of chamber adjoining with soft rock masses

LIU Chuan-xiao¹, WANG Long¹, LIU Zhi-hao¹, HUANG Dong-chen¹, ZHANG Xiu-li²

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China; 2. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: It is important to determine the stability of underground projects which are driven in soft rock masses or buried in deep site. Restraining the floor heave of the chamber adjoining with soft rock masses is an effective approach to control its stability and ensure its service period. The flexible inverted arch with composite structures is designed mainly to reduce the floor heave, and its operating mechanism is also studied. The time effects of the flexible inverted arch with composite structures to control the floor heave of the chamber adjoining soft rock masses will include the initial stage with negative floor heave, flexible support stage to absorb deformation energy, and rigid support stage to prolong its service period. The flexible support effect has steadily ensured a longer service period of the chamber. The practices indicate that the time effects of negative floor heave under test conditions last a period of 63 days, the controlling period of flexible structure to the floor heave may be up to 158 days, and the service period of 140 days of the testing roadway is prolonged by the rigid structure of inverted arch to restrain the floor heave. Therefore, the testing roadway may dispense with rebuilding work in one year, particularly in the floor heave. Although the flexible inverted arch with composite structures has distinct effects to control the floor heave, the overall stability of the chamber can not simply depend on the only factor. The relatively weak boundary part of the supporting system will become the main cause of the destruction of the chamber adjoining soft rock masses.

Key words: time effect; flexible inverted arch with composite structures; floor heave; rigid structure; soft rock mass

0 引 言

软岩硐室的稳定性控制问题一直是困扰地下工程建设的重大难题之一, 而由于硐室断面及其设计功能需求, 多数情况下的支护强度不能做到均一化, 致使

软岩硐室的底臌问题尤为突出。底臌是煤矿巷道等地下工程中经常面对的一种动力现象, 不仅带来繁杂的

基金项目: 国家自然科学基金项目(51004098)

收稿日期: 2011-07-07

硐室维护工作量、增加控制成本, 而且严重影响着地下工程的安全应用^[1-4]。

硐室底臃发育的影响因素众多, 其中底板岩性为首要原因, 底板软弱岩层的节理裂隙发育程度、强度及厚度等都将直接影响底臃的规模及其形态。多数赋存较深的硐室, 其围岩属于典型的高应力软岩, 在高应力的瞬时作用下显现出软岩特性, 长期作用下将由原来的弹塑性转变为塑性流变性, 底板臃起的时间相关性增强。断层等构造运动及其节理裂隙发育将破坏围岩的完整性, 水平构造应力作用下底板岩层的向上移动是硐室底臃的主要原因。硐室底板软岩中经常含有的膨胀性黏土矿物, 如高岭土、蒙脱石、伊利石等, 在吸水后使得岩体呈现明显的塑性、膨胀性, 因此水理作用会加剧底臃程度。此外, 在硐室跨度和传统的支护模式设计时, 如果没有将底板控制纳入整个支护体系, 将必然产生典型的底臃现象^[5-6]。

基于不同的控制机理, 传统的硐室底臃控制方法分为加固法与卸压法两大类。加固法包括锚杆加固、注浆加固、反底拱加固和封闭式支架支护等, 其中锚杆加固的目的在于加大围岩的内聚力、增强岩层的抗弯强度和抗剪切能力, 一般适用于地质条件较好的岩体。注浆加固使岩体裂隙被充填密实, 改善了支护结构的受力状况, 一般同其他支护形式联合使用。反底拱加固属于永久性硐室底板支护方式, 一般采用混凝土浇筑, 向底板施加均匀的抵抗力, 但是在破坏后难以处理, 因此急需保证足够长的服务年限。采用封闭式支架可以提供较大的支护阻力以阻止底板较深处岩层破坏区的发展, 但其支护成本高, 施工工序复杂。卸压法主要包括切缝卸压法、钻孔卸压法、松动爆破卸压法和掘巷卸压法。切缝卸压与钻孔卸压法通过在两帮切缝、钻孔而使应力重新分布, 将最大主应力向深部围岩转移, 增加围岩的承载范围。爆破卸压法的实质是利用爆破后的裂隙, 使最大支承压力转移到岩体深部。掘巷卸压法是在待维护的软岩硐室附近岩体中开掘卸压巷, 使被保护硐室底板的岩层处于应力降低区, 从而提高底板岩层的稳定性, 减少底臃量^[7-9]。

综合分析软岩硐室稳定性控制的实践效果, 单一的方法往往不能有效控制底臃, 联合两种以上的控制方法治理底臃, 并考虑施工工艺的合理性与复杂性, 为科学而合理的途径。本文提出一种兼具卸压法与加固法优点的复合结构柔性反底拱底臃控制方法, 并主要基于实测资料进行软岩硐室稳定性控制的时效分析, 具有一定的理论指导意义和实用价值。

1 复合结构柔性反底拱及其底臃控制

机理

遵循柔性结构与刚性结构复合的支护原则^[10], 提出了一种控制软岩硐室底臃的复合结构柔性反底拱支护方案: 底板采用力学性质各异的多层材料形成底弧拱型, 柔性结构通过大幅吸收变形能来协调整体支护结构的受力状态, 从而有效控制变形; 刚性结构通过保持足够的刚度, 限制岩体变形的发展。

复合结构柔性反底拱结构示意图如图1所示。

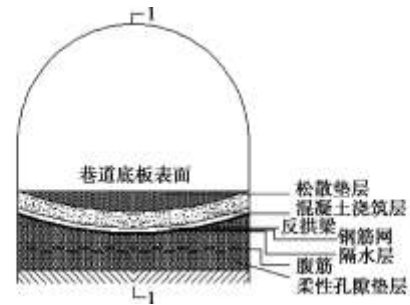


图1 复合结构柔性反底拱结构组成

Fig. 1 Constitution of flexible inverted arch with composite structures

(1) 柔性孔隙垫层具有较强的变形能力, 直接面对底板岩层, 是体现该复合结构前期效能的主要部分。

(2) 腹筋预埋于柔性孔隙垫层中, 可以提高后期注浆后支护系统的刚度^[11]。

(3) 隔水层主要应用于防止上部来水经柔性孔隙垫层而导入底板软岩。

(4) 钢筋网使其上面的反拱梁可以更加均匀地承载来自底板的应力, 其自身具备弹性变形优势, 同时对隔水层具有一定的保护作用。

(5) 反拱梁兼具弹性变形和较高强度双重特点, 是决定该复合结构力学性能的关键组分。

(6) 混凝土浇筑层以刚性为主, 可以提供较高的支护强度, 是体现该复合结构后期效能的主要部分, 但由于其自重, 可能在浇筑初期会对底板形成一定的压缩变形, 从而造成负底臃, 在底臃控制工程上是有利的。

(7) 松散垫层仅起覆盖作用, 以形成软岩硐室的底板平面, 对该复合结构力学性能的影响可忽略不计。

柔性支护结构主要由柔性孔隙垫层、隔水层、钢筋网和反拱梁构成, 通过提供较大许用变形而吸收能量、让压, 达到在较长时期内控制底臃的目的。刚性支护结构主要由反拱梁和混凝土浇筑层构成, 可提供较高的支护强度, 阻止底板岩层进一步变形, 后期注浆加固后的柔性孔隙垫层亦将加入刚性支护结构体系。

按照硐室服务年限, 复合结构柔性反底拱的底臃控制原理可分为3部分: 成拱初期, 以混凝土浇筑层

重量为主而对底板造成压缩作用,形成了负底臃现象,有利于硐室稳定,但该阶段历时较短,难以准确判定;吸收变形能为主要特征的柔性控制阶段,自压密开始至许用变形为止,是柔性支护结构发挥作用的时期,为复合结构柔性反底拱支护体系的主要服务期,历时较长,可以控制;刚性控制为主的支护阶段,柔性支护结构在达到许用变形时丧失吸收变形能的能力,向柔性孔隙垫层内实施注浆加固措施,配合原设计刚性支护结构,大幅度提高复合结构柔性反底拱的整体刚度,从而可以继续延长硐室的服务年限,该阶段可视现场条件灵活控制。

2 复合结构柔性反底拱控制底臃现场工业性试验

2.1 现场概况

山东华宁集团鑫安煤矿-800 胶带暗斜井为-800 m 水平的通风、运输、管线敷设用巷道,在 3 煤顶板 30 m 左右顺层掘进。复合结构柔性反底拱控制底臃的现场工业性试验段位于-800 胶带暗斜井的-415 m 水平,长度 20 m,宽度达 5.2 m。试验段巷道所穿过的岩层主要为泥质粉细砂岩,节理发育,亲水性强,伴有明显的构造作用痕迹。曾经,试验段巷道围岩变形显著,底臃现象突出,成巷约 1 a 内 4 次维修,严重制约着矿井的安全生产。为控制严重的巷道底臃,在常规锚网索喷支护的基础上,对本试验段的巷道底板增加使用复合结构柔性反底拱。

2.2 岩石力学性质实验

泥质粉细砂岩岩样取自试验段巷道所穿过的岩层,实验在山东农业大学新近购置的长春科新实验仪器有限公司 SAW-2000 型微机控制电液伺服岩石三轴压力试验机上进行,结果见表 1。泥质粉细砂岩的单轴抗压强度 σ_c 、弹性模量 E 和泊松比 μ 的平均值分别为 33.1135 MPa, 15763 MPa, 0.34, 为软岩。

表 1 泥质粉细砂岩力学性质实验结果

Table 1 Mechanical parameters of argillaceous fine siltstone

试样	尺寸/mm	σ_c /MPa	E /MPa	μ
1	$\phi 47 \times 74$	32.0526	13450	0.27
2	$\phi 47 \times 74$	29.2524	18654	0.4
3	$\phi 47 \times 73$	38.0356	15186	0.36

2.3 试验段巷道底臃控制的反底拱参数确定

(1) 硐室底板破碎深度

硐室底板破碎边界的近似计算模型,如图 2 所示。硐室底板破碎深度为

$$y = \sqrt{\frac{3PW^2 - 12Px^2}{4P + 32(C + \lambda P)}} \quad (1)$$

式中, P 为垂直地应力(MPa), W 为硐室底板宽度(m),

C 为硐室底板岩石黏聚强度(MPa), λ 为侧压系数, y 为硐室底板破碎深度(m), x 为硐室底板距离中心点距离(m)。

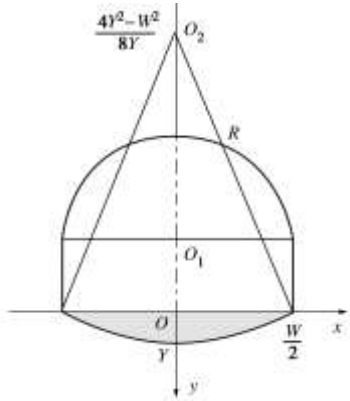


图 2 硐室底板破碎边界计算模型

Fig. 2 Calculating model for destroyed boundary in bottom strata of chamber

-800 胶带暗斜井的-415 m 水平试验段巷道位置的垂直地应力为 7.75 MPa,巷道底板宽度为 5.2 m,泥质粉细砂岩的黏聚强度取 5 MPa,侧压系数取 0.2。当 $x=0$ 时,得到巷道底板的最大破碎深度 Y 约为 1.6 m。

(2) 复合结构柔性反底拱参数设计

根据巷道底板的最大破碎深度,设计复合结构柔性反底拱的埋藏深度为 1.6 m。由图 2 可得复合结构柔性反底拱的弧拱半径为 $R = (4Y^2 + W^2) / 8Y \approx 2.9$ m。

柔性孔隙垫层选择炉渣,铺填厚度 800 mm;腹筋为破断后的废旧钢丝绳;隔水层选取厚 100 mm 的泡沫塑料;钢筋网规格为 1950 mm \times 1050 mm,网格 150 mm \times 150 mm,钢筋直径 6.5 mm;反拱梁为#25U 型钢梁,间距 800 mm;弧型混凝土浇筑层厚 350 mm,混凝土强度等级 C20,水灰比 0.4;松散垫层材料为石子。

图 1 的 1-1 剖面图如图 3 所示,反映了复合结构柔性反底拱中央位置的实际结构组成。

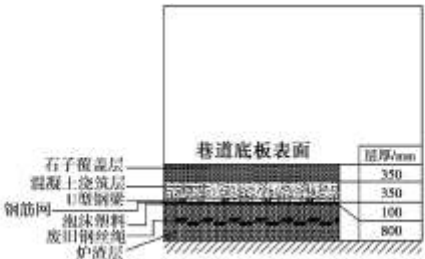


图 3 图 1 的 1-1 剖面图

Fig. 3 Section plane 1-1 in Fig. 1

2.4 矿压观测资料

针对复合结构柔性反底拱试验段,制定矿压观测方案并实施了现场矿压观测,包括巷道顶底板高度、两帮宽度、底板至基准腰线的距离、顶板至基准腰线的距离等。矿压观测的测区位于现场试验段巷道的中

间位置, 考虑巷道长度方向边界效应的影响, 矿压观测资料亦能够充分说明反底拱的控制效果。矿压观测结果如图 4 所示。

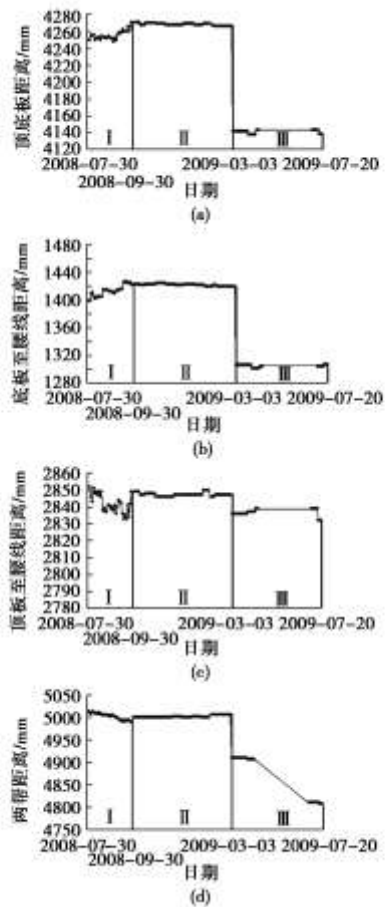


图 4 巷道矿压观测结果

Fig. 4 Observed results of roadway control

依据矿压观测曲线的几何特征, 统计 4 个时间节点所对应的巷道表面位移量, 见表 2。

表 2 巷道表面位移量统计表

Table 2 Displacements on surface of roadway									
日期	顶底板/mm		底-腰线 /mm		顶-腰线 /mm		两帮/mm		t/d
	距离	移近	距离	底臃	距离	顶沉	距离	移近	
2008-07-30	4250	0	1398	0	2852	0	5014	0	0
2008-09-30	4271	-21	1422	-24	2849	3	4990	24	63
2009-03-03	4142	108	1306	92	2836	16	4910	104	220
2009-07-20	4139	111	1307	91	2832	20	4808	206	360

建立巷道表面位移量发展与巷道服务时间之间的关系曲线, 如图 5 所示。

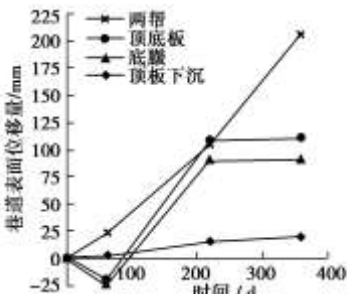


图 5 巷道表面位移与巷道服务时间关系曲线

Fig. 5 Relationship between surface displacement and service period of roadway

3 软岩硐室稳定性的复合结构柔性反底拱控制时效分析

3.1 成拱初期的负底臃效应

由图 4 及表 2 可见, 在 2008 年 7 月 30 日—2008 年 9 月 30 日共 63 d 的初期阶段, 反底拱在其刚性结构自重以及柔性结构变形的共同作用下出现下沉, 形成了负底臃现象, 表现为巷道底板表面下降。顶底板移近量由底臃量与顶板下沉量构成, 该阶段的巷道顶底板移近量-21 mm, 其中顶板下沉量 3 mm, 底臃量为-24 mm。加之巷道两帮移近量仅 24 mm, 表明硐室整体稳定性好。究其原因, 成拱初期的巷道围岩应力被充分释放, 造成底板臃起的力源不足。同时, 炉渣垫层在其上方混凝土浇筑层的作用下被压密, 致使底板不升反降。本文将成拱初期的负底臃效应区标示为图 4 中的第 I 阶段。

3.2 反底拱柔性结构的变形能吸收效果

图 4 所示的第 II 阶段为复合结构柔性反底拱支护体系的主要服务期, 自 2008 年 9 月 30 日—2009 年 3 月 3 日共 158 d。该阶段的全部矿压观测曲线具有典型的近乎水平的特征, 表明巷道基本未产生附加表面位移, 巷道整体稳定性高。反底拱的柔性结构起到了控制性作用, 几乎吸收了 158 d 内来自巷道底板岩层的全部变形能, 从而保证了较长时期内巷道的整体稳定。

反底拱柔性结构的变形能吸收能力是有限的, 图 4 和表 2 证明, 巷道表面位移于 2009 年 3 月 3 日发生了突变, 巷道顶底板移近量 108 mm, 顶板下沉量 16 mm, 底臃量 92 mm, 两帮移近量 104 mm。巷道表面位移时间拐点的出现, 标志着复合结构柔性反底拱支护体系主要服务阶段的结束, 反底拱的柔性控制特征丧失, 并自此转入了以刚性控制为主的支护阶段。

3.3 后期反底拱刚性结构的作用效果

图 4 所示的第 III 阶段为复合结构柔性反底拱的延长使用期, 自 2009 年 3 月 3 日—2009 年 7 月 20 日共 140 d。刚性支护结构辅以炉渣层内注浆, 提高了已经

丧失柔性特征的反底拱的整体刚度, 以尽可能地延长其服务年限。该阶段的反底拱底臃控制效果明显, 图 4 及表 2 所表示的巷道顶底板移近量、顶板下沉量和底臃量几乎没有明显增加。

2009 年 7 月 20 日所拍摄的现场照片, 见图 6。



图 6 反底拱试验段底臃控制效果

Fig. 6 Controlling effect of floor heave of test tunnel with inverted arch

反底拱试验段的底臃程度同相邻未做反底拱的巷道段相比较, 明显轻微。虽然存在一定程度的试验段巷道长度边界效应的影响, 但不影响对巷道底臃控制效果评价的准确性。现场工业性试验验证了复合结构柔性反底拱底臃控制的主要三阶段, 该条件下的巷道在 1 a 内不需要底板修复。

虽然反底拱的底臃控制作用一直明显, 但并非始终对巷道的整体稳定性做出重要贡献。由图 4、表 2 和图 5 可见, 反底拱作用后期的两帮移近量曲线依然保持急速上升的特征, 表明两帮岩体成为应力释放及变形发展的关键部位。即在复合结构柔性反底拱进入后期刚性支护阶段后, 依然可以起到良好的底臃控制作用, 但继续增加的围岩应力水平, 将围绕巷周边界寻求新的突破, 从而对巷道整体稳定性构成威胁。

4 主要研究结论

(1) 设计了应用于软岩硐室底臃控制的复合结构柔性反底拱, 研究了其作用机理。

(2) 复合结构柔性反底拱控制底臃的时间效应, 包括成拱初期的负底臃效应、吸收变形能为主要特征的柔性支护阶段和后期刚性支护阶段, 其中柔性支护阶段保证了相对稳定的软岩硐室服务年限。

(3) 现场工业性试验表明, 试验条件下的负底臃效应历时 63 d, 柔性结构控制底臃的作用时间为 158 d, 反底拱刚性结构对底臃的控制可以延长巷道的服务年限 140 d。

(4) 复合结构柔性反底拱的底臃控制效果明显, 但是硐室边界的其他相对薄弱的支护部位, 依然可能转化为威胁其整体稳定性的主因。

参考文献:

[1] 王卫军, 冯涛. 加固两帮控制深井巷道底鼓的机理研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(5): 808 - 811. (WANG

Wei-jun, FENG Tao. Study on mechanism of reinforcing sides to control floor heave of extraction opening[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(5): 808 - 811. (in Chinese))

[2] 康红普, 陆士良. 巷道底鼓机理的分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1991, 10(4): 362 - 373. (KANG Hong-pu, LU Shi-liang. An analysis on the mechanism of roadway floor heave[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1991, 10(4): 362 - 373. (in Chinese))

[3] 赵权. 巷道底鼓机理及防治措施[J]. 煤炭技术, 2007, 26(8): 49 - 51. (ZHAO Quan. Mechanism of tunnel bottom swelling and measures of prevention and cure[J]. Coal Technology, 2007, 26(8): 49 - 51. (in Chinese))

[4] 曹玉亮. 软岩隧道围岩稳定性分析与支护研究[D]. 西安: 煤炭科学研究总院, 2007. (CAO Yu-liang. Analysis of surrounding rock stability of soft rock tunnel and study on its supports[D]. Xi'an: China Coal Research Institute, 2007. (in Chinese))

[5] 黄胜, 刘巍, 于驰. 浅谈巷道底鼓的防治措施[J]. 矿业工程, 2006, 4(5): 27 - 29. (HUANG Sheng, LIU Wei, YU Chi. Precautions against swell-up of tunnel bottom plate[J]. Mining Engineering, 2006, 4(5): 27 - 29. (in Chinese))

[6] 王其胜, 李夕兵, 李地元. 深部开采流变性软岩巷道底鼓原因与防治[J]. 金属矿山, 2008(1): 47 - 49, 150. (WANG Qi-sheng, LI Xi-bing, LI Di-yuan. Causes and control of floor heave in rheological weak rock roadway at depth[J]. Metal Mine, 2008(1): 47 - 49, 150. (in Chinese))

[7] 赵晓举. 平煤集团各矿井巷道底鼓防治技术[J]. 煤炭科技, 2008, 34(7): 48 - 50. (ZHAO Xiao-ju. Pingdingshan coal group: preventive and control technology against roadway floor heave in its coal mines[J]. China Coal, 2008, 34(7): 48 - 50. (in Chinese))

[8] 杨新兴. 长锚杆及反底拱在维修加固软岩硐室中的应用[J]. 河北煤炭, 2002(1): 36 - 37. (YANG Xin-xing. Application of long-bolt and back inverted arch in maintenance and reinforcement of free stone chamber[J]. Hebei Coal, 2002(1): 36 - 37. (in Chinese))

[9] 任建民. 锚注技术在处理大断面硐室底臃中的应用[J]. 煤炭技术, 2009, 28(6): 125 - 126. (REN Jian-min. Application of bolting and shotcreting technology to dealing with floor heave[J]. Coal Technology, 2009, 28(6): 125 - 126. (in Chinese))

[10] 张美政. 复合结构柔性反底拱应用于软岩硐室稳定性控制研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2010. (ZHANG Mei-zheng.

Study on composite structure for flexible inverted arch support to stability of tunnel adjoining with soft rock mass[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2010. (in Chinese))

[11] NARAYAMAN R, PALANJING A S. Factors influencing the strength of steel fiber reinforced concrete[J]. Developments of Fiber Reinforced Cement and Concrete, 1986(2): 1 - 8.