

防水型单层衬砌在青岛地铁硬岩隧道中的应用^{*}

邓一三¹ 李金明² 李祥东³ 赵强³ 温书亿¹

(1. 中铁科学研究院有限公司, 610031, 成都; 2. 青岛市住房和城乡建设局, 266100, 青岛;

3. 青岛地铁集团有限公司, 266100, 青岛//第一作者, 高级工程师)

摘要 在探讨青岛地铁硬岩隧道既往所用复合式衬砌问题的基础上,提出了防水型单层衬砌的结构形式。通过对该衬砌的技术特点及其在硬岩隧道中应用优势的分析,确定了在青岛地铁工程中使用该型衬砌的合理性。依托青岛地铁硬岩隧道试验段工程,对防水型单层衬砌的设计参数、施工工艺、质量控制措施进行了研究,并采用现场试验结果和监测数据进行了验证。结果表明:通过严格控制施工工艺和作业流程,防水型单层衬砌的高强喷射纤维混凝土强度和抗裂性均满足硬岩隧道永久支护的要求;衬砌中喷涂防水层的应用,不仅较好解决了喷射混凝土防水抗渗性能差的缺陷,夹层较强的黏结力也使得多层喷射混凝土间能够形成共同承载体系;试验段隧洞内和地面各项监测数据均较为平稳。在硬岩隧道中采用防水型单层衬砌可避免传统复合式衬砌的部分固有缺陷,其力学性能、抗渗性能、夹层黏结强度均可满足地铁隧道的要求。

关键词 地铁; 硬岩隧道; 防水型单层衬砌

中图分类号 U455.91;U456.3⁺1:U231.3

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.06.022

Application of Waterproof Single-layer Lining in Qingdao Metro Hard-rock Tunnel

DENG Yisan, LI Jinming, LI Xiangdong, ZHAO Qiang, WEN Shuyi

Abstract Based on the discussion of conventional composite lining used in Qingdao Metro hard-rock tunnel, the structure form of waterproof single-layer lining is proposed. Through analysis of the technical features of this lining and its application advantage in hard-rock tunnel, the reasonability of adopting this lining type in Qingdao Metro project is determined. Based on the hard-rock tunnel test section project of Qingdao Metro, the design parameters, construction techniques and quality control measures of waterproof single-layer lining are studied, and then verified by field-monitored results and test data. The results show that: through strict control of construction techniques and operation process, the strength and crack

resistance of high-strength fiber-reinforced shotcrete concrete for waterproof single-layer lining meet the requirements of hard-rock tunnel permanent support. The application of sprayed waterproof interlayer on the lining solves the poor waterproof and anti-seepage performance of shotcrete, and the strong adhesive force of interlayer makes the multi-layer shotcrete form a common bearing system. The monitoring data in the tunnel and on the ground of the test section are both relatively stable. Using waterproof single-layer lining in hard-rock tunnel can avoid some inherent defects of conventional composite lining, and its mechanical property, anti-seepage performance and adhesive force strength can meet the requirements of metro tunnels.

Key words metro; hard-rock tunnel; waterproof single-layer lining

First-author's address China Railway Academy Co., Ltd., 610031, Chengdu, China

青岛市为海滨丘陵城市,下伏岩层以风化程度低、强度高、完整性好为主要特点^[1-2]。在此硬岩地层中,钻爆法隧道因其断面形式灵活性、地层适应性好,被广泛应用于地铁车站、区间和辅助通道的建设中^[3-4]。

青岛市既往地铁隧道的衬砌形式以复合式衬砌为主,该衬砌以锚杆、喷射混凝土和支护钢架为初期支护,在敷设卷材防水板后,施作二次模筑混凝土衬砌。由于二次模筑衬砌与初期支护之间由卷材防水板分隔,长期水土压力由围岩和二次模筑衬砌共同承担^[5-6]。根据工程实践发现,硬岩隧道的复合式衬砌主要存在以下问题:

1) 根据新奥法原理,青岛地铁隧道因岩体坚硬,由其承担主要的地层压应力,但由于复合式衬砌的二次模筑衬砌与围岩分离,导致其与围岩的长期共同受力机理不明确。因此,为确保工程安全,

^{*} 青岛地铁集团科研课题(M1-ZX-2018-005)

在设计中往往由二次模筑衬砌承担较大部分的地层压力和全部的水压力,使得初期支护变成临时支护,由此造成经济上的浪费,并导致施工组织的复杂化和工期的拖延。

2) 复合式衬砌中的初期支护不具备防水功能,地下水直接作用于卷材防水板和二次模筑衬砌。少量的硬岩裂隙水被人为地富集于两次衬砌之间,造成水压力过大和冻胀等一系列问题。在水头较高的深埋隧道中,该问题尤其突出。

3) 硬岩隧道需采用爆破法开挖,超挖现象严重,导致复合式衬砌的初期支护与围岩之间需大量喷射混凝土回填;且因初期支护钢架和钢筋网的遮挡,回填不易密实,又造成初期支护与围岩无法紧密贴合,难以起到约束围岩变形的作用。

4) 复合式衬砌所采用的薄膜式卷材防水板,在钢筋绑扎、焊接和混凝土浇筑等过程中,极易被烧坏或刺破,敷设质量不易保证。

为解决复合式衬砌在硬岩隧道中存在的上述问题,20 世纪 70 年代,单层衬砌作为一种新的隧道支护结构逐渐发展起来,并随着喷涂防水材料的应用而逐渐向防水型单层衬砌转变。青岛地铁的高速发展,为防水型单层衬砌的应用提供了广阔前景。

1 防水型单层衬砌应用于硬岩隧道的优势

防水型单层衬砌是在设置锚杆等支护构件后,立即喷射 1 层混凝土封闭围岩,再喷涂防水材料,最后再次喷射 1 层或多层混凝土。支护结构各层间具有较强的黏结力,可充分传递剪力。将防水型单层衬砌应用于硬岩隧道具有如下优势:

1) 防水型单层衬砌的材料以喷射混凝土(或喷射纤维混凝土)为主,能够做到与开挖岩面的“密贴”,在转角、开口和变断面位置,结构轮廓圆顺,可充分发挥硬岩隧道中围岩的支护作用。

2) 防水型单层衬砌的喷涂防水层提高了叠合结构的整体防水抗渗性能,解决了以往因喷射混凝土防水抗渗性能差而导致的隧道渗漏水问题。

3) 防水型单层衬砌中的喷涂防水层具有一定

的黏结及抗剪强度,使得多层喷射的混凝土结构具有叠合梁结构的性质,提高了支护系统的可靠性。

4) 防水型单层衬砌取消了复合式衬砌的二次模筑衬砌,减小了衬砌厚度,缩小了开挖断面,避免了因超挖导致的回填土方。

5) 防水型单层衬砌简化了施工组织,省掉了钢筋绑扎,避免了浇筑二次衬砌时模板台车或脚手架的安装和拆除,缩短了隧道建设工期。

2 防水型单层衬砌的应用现状

目前,防水型单层衬砌已是挪威、瑞典及芬兰等北欧国家的标准隧道衬砌结构。北欧的城市地铁,如斯德哥尔摩地铁、赫尔辛基地铁及奥斯陆地铁均采用了此技术^[7]。

我国近年来也开始在隧道工程中采用单层衬砌,并已在公路隧道、铁路隧洞、水工输水隧洞及地下储库等工程中试用,如齐溪电站引水洞、乐善村二号隧道、汕头液化气储库工程及秦岭隧道等工程^[8-11]。但上述国内地铁隧道工程,仅是取消了复合式衬砌的二次模筑衬砌,并未采用设置喷涂防水夹层的防水型单层衬砌,因此衬砌防水抗渗性较差,无法应用于地铁等防水性能要求较高的隧道工程。

3 防水型单层衬砌在青岛地铁隧道中的应用

为解决既往青岛地铁隧道衬砌存在的问题,发挥防水型单层衬砌在硬岩隧道中的优势,改进硬岩隧道支护体系,选取青岛地铁 4 号线昌乐路车站配线区间,作为研究防水型单层衬砌应用的试验段。

3.1 试验段防水型单层衬砌的设计参数

试验段为典型硬岩隧道,位于青岛市北区,全长 220 m,采用钻爆法施工。隧道断面为拱顶直墙,开挖宽度为 9.6 m,埋深为 30 ~ 39 m。隧道洞身主要穿越微风化花岗岩,场区地下水以基岩裂隙水为主,围岩级别为Ⅱ级和Ⅲ级。隧道支护参数根据挪威法(Q 法)进行设计,具体见表 1。

表 1 试验段隧道支护参数

Tab.1 Support parameters of test section tunnel

围岩级别	中空注浆锚杆		第一层衬砌		喷涂防水层	第二层衬砌	
	长度/m	横、纵向间距/m	类型	厚度/mm		类型	厚度/mm
Ⅱ级	3.0	局部裂隙设置	C35 喷射纤维混凝土	80	Tam Seal800,厚 4 mm	C35 喷射纤维混凝土	70
Ⅲ级	3.0	1.5	C35 喷射纤维混凝土	100	Tam Seal800,厚 4 mm	C35 喷射纤维混凝土	100

由表 1 可见:试验段采用的 C35 喷射纤维混凝土可作为防水型单层衬砌的基材,其中纤维选用挪曼尔特牌聚烯烃粗纤维。试验段纤维性能参数见表 2。

表 2 试验段纤维性能参数

Tab.2 Fiber property parameters of test section

参数	取值
长度/mm	48
直径/mm	0.7
密度/(g/cm ³)	0.91
抗压强度/MPa	500
弹性模量/GPa	7
纤维掺量/(kg/m ³)	6

为将喷射纤维混凝土作为隧道永久衬砌的基

表 3 喷射纤维混凝土配合比设计

Tab.3 Design of fiber-reinforced shotcrete mix proportion

单位:kg

名称	取值	厂商
水泥(P.O 52.5)	500.0	青岛即墨中联水泥有限公司
水	200.0	
砂	930.0	
碎石	620.0	
TamCem 18(高效减水剂)	8.5	挪曼尔特(上海)贸易有限公司
TamCem Nanosilica(纳米二氧化硅)	5.0	挪曼尔特(上海)贸易有限公司
TamFib SP48(纤维)	6.0	挪曼尔特(上海)贸易有限公司
Tamshot 90AF(无碱速凝剂)	40.0	挪曼尔特(上海)贸易有限公司

纤维混凝土喷射施工过程中,除根据砂石料的含水率对其配合比进行微调外,其余施工工艺流程均按照图 1 执行。

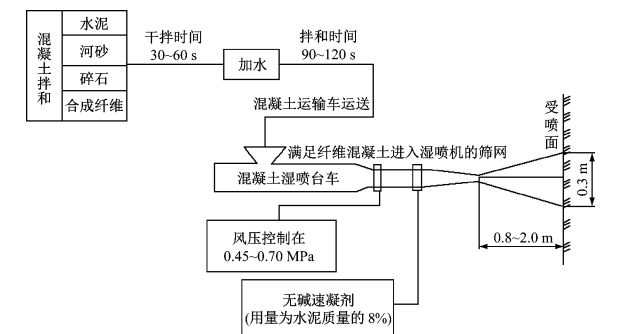


图 1 试验段防水型单层衬砌施工工艺流程图
Fig.1 Process diagram of test section waterproof single-layer lining construction tenique

3.2.2 关键施工质量控制措施

针对试验段所采用的施工工艺,其质量控制措

材,需通过配合比设计(见表 3),均衡混凝土的强度和工作性能,使其达到以下指标:抗裂强度大于 2.2 MPa,抗渗等级达到 P12,施工过程中不得离析、泌水或纤维聚团。

3.2 试验段防水型单层衬砌的施工工艺及质量控制

防水型单层衬砌采用的 C35 高强喷射纤维混凝土对施工设备、工艺及质量控制均有较高的要求。试验段通过严格的流程控制,较好地达成了衬砌的设计指标。

3.2.1 施工设备及工艺

根据试验段现场施工条件,湿喷设备选用河南耿力湿喷机,其工作效率为 7 m³/h,喷射料最大水平输送距离为 30 m,最大垂直输送距离为 20 m。

施的要点为:

- 1) 混凝土拌和应先投放粗骨料、细骨料、水泥、纤维,干拌 60 s 后,再加水、减水剂及硅灰剂。
- 2) 喷射作业前,应采用高压风及水冲洗围岩面,使围岩面湿润,以清除浮石和虚碴,并保证喷射混凝土与围岩有可靠的黏接强度。
- 3) 硬岩隧道中,无钢筋网的喷射混凝土回弹量将会显著提高,故喷射作业时,应通过控制喷射角度、喷射距离及单次喷射量来减少回弹。喷射角度应尽可能与基面垂直,喷射距离宜小于 2 m。人工喷射时常倾向于通过降低风量和风压来保持正确的喷射距离,但该方式反而将对喷射混凝土的质量产生不利影响。因此,在控制喷射距离的同时,排风量不应小于 11 m³/min,风压应为 0.55 ~ 0.65 MPa。单次喷射混凝土厚度不宜超过 5 cm,可通过多次喷射达到设计厚度。

4) 喷射混凝土终凝后的养护时间不得少于 7 d。冬季施工期间,日均温度低于 5℃时,不得采用喷水养护。

3.3 试验段防水型单层衬砌性能的现场试验

3.3.1 喷射纤维混凝土抗裂强度试验

喷射纤维混凝土抗裂强度是防水型单层衬砌性能的重要指标。当喷射纤维混凝土在拉伸和弯曲荷载的作用下开裂时,掺入的聚烯烃纤维将承接混凝土传递的荷载并减缓裂缝扩展,使混凝土在出现裂缝后仍然具有一定的裂后残余强度与变形能力,从而显著提高混凝土的抗裂韧性。

由于单轴拉伸试件的截面较小,局部纤维的方向性因素对试件拉伸强度的实测值影响较大,故采用弯曲梁试验来测定材料的抗裂强度,试验装置如图 2。试验设备为日本岛津 AG-IS-250 kN 试验机,试件为采用 C35 喷射纤维混凝土制作的 4 块尺寸为 150 mm×150 mm×550 mm 的混凝土块。



图 2 弯曲梁试验装置

Fig. 2 Bent beam test device

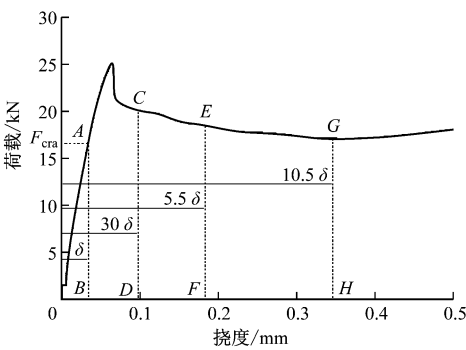
对试件进行连续、均匀加载,根据加载荷载及裂缝处挠度绘制荷载-挠度曲线(见图 3),并将通过曲线得到的比例极限 f_{LOP} 作为材料初裂时的强度(见表 4)。 f_{LOP} 与试验参数的关系为:

$$f_{LOP} = \frac{3F_{cra}L}{2bh^2}$$

式中:

- b ——试件截面宽度;
- h ——试件截面高度;
- L ——试件跨距;
- F_{cra} ——荷载-挠度曲线中比例极限所对应的加载荷载。

由图 3 和表 4 可见:试验试件的初裂强度均已超过 2.2 MPa,且保有足够的裂后残余强度。



注:δ 为试件的初裂挠度。

图 3 代表性试件的荷载-挠度曲线

Fig. 3 Load-deflection curve of representative specimens

表 4 喷射纤维混凝土的初裂抗弯强度

Tab. 4 Bending strength of fiber-reinforced shotcrete at initial crack

名称	F_{cra}/kN	挠度/mm	f_{LOP}/MPa
试件 1	16.26	0.026	2.2
试件 2	17.14	0.032	2.3
试件 3	16.62	0.030	2.2
试件 4	16.70	0.033	2.2

3.3.2 喷涂防水层的抗渗性和黏结性试验

防水型单层衬砌中喷涂防水夹层的应用,较好地解决了传统喷射混凝土衬砌在防水抗渗性能上的缺陷;同时较强的黏结能力,也使得多层喷射混凝土之间能够充分传递剪力形成共同承载体系。因此,对应用于试验段的喷涂防水层进行了抗渗性和黏结性试验。

3.3.2.1 喷涂防水层抗渗性试验

试件为通过大板试块制作的 6 个 $\phi 150$ mm 的圆柱体芯样。芯样的混凝土分两次喷射形成,中间涂刷厚 4 mm 的挪曼尔特牌 Tam Seal800 喷涂防水层。

将试件置于抗渗仪封闭后,按照每 8 h 增加 0.1 MPa 的速率,加压至抗渗等级 P12 的压强(1.2 MPa)并稳压 24 h,受试件均未出现渗水。

3.3.2.2 喷涂防水层黏结性试验

试件通过在现场衬砌中直接钻芯制取,其实测直径为 45 mm。2 个区域共钻芯 6 处试件。通过轴拉试验确定试件喷涂防水层的黏结性,试验加载速率为 0.1 MPa/min。当试件破坏面为喷涂防水层时,试验结果有效。黏结性试验试件的破坏面见图 4。



图4 黏结性试验试件的破坏面

Fig.4 Failure surface of specimens for adhesivity test

试验所采用的6个试件中,Tam Seal800喷涂防水材料对喷射混凝土的黏接强度均超过1.0 MPa,且延伸率可达150%。

3.4 试验段现场监测与分析

昌乐路站配线区间施工期间,对防水型单层衬砌试验段进行了现场监控量测。监测数据以监测断面完成两层混凝土喷射为基准。监测内容包括拱顶沉降、净空收敛和地面沉降。

3.4.1 拱顶沉降与净空收敛

试验段隧道拱顶沉降时程曲线如图5所示。由图5可见:隧道拱顶沉降累计变化量最大点为3GDC07,其值为2.3 mm;日沉降变化速率最大点为3GDC10,沉降变化速率为0.5 mm/d;拱顶沉降监测数据受爆破施工影响出现高频波动变化,但总体趋势平缓,且其变化速率及累计值均未超标。

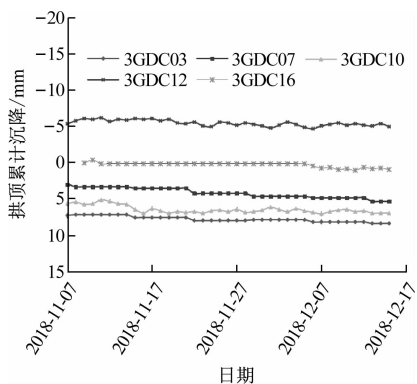


图5 试验段隧道拱顶沉降时程曲线

Fig.5 Time-history curve of test section tunnel vault settlement

试验段隧道水平净空收敛时程曲线如图6所示。由图6可见:隧道水平净空收敛累计变化量最大点为3JKJ4-2,其值为-0.49 mm;日水平净空收敛变化速率最大点也在该处,其值为0.71 mm/d;

水平净空收敛周监测数据变化平缓,且其变化速率及累计值均未超标。

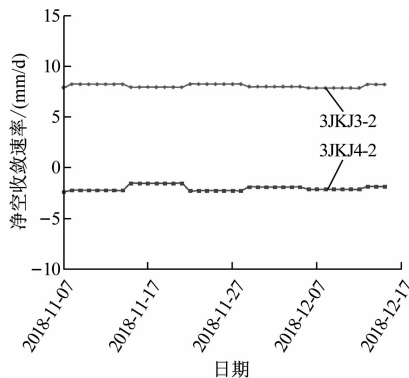


图6 试验段隧道水平净空收敛时程曲线

Fig.6 Time-history curve of test section tunnel horizontal net clearance convergence

3.4.2 地面沉降

试验段隧道地面沉降时程曲线如图7所示。由图7可见:隧道地面沉降累计变化量最大点为3DBC8-3,其值为-1.41 mm;地面沉降日变化速率最大点为3DBC8-4,其值为0.6 mm/d;地面沉降周监测数据变化趋势平缓,且其变化速率及累计值均未超标。

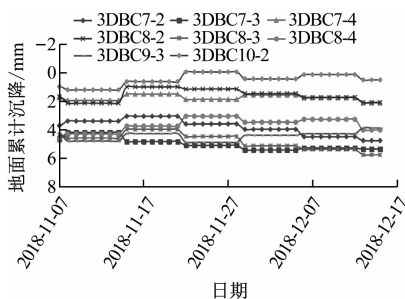


图7 试验段隧道地面沉降时程曲线

Fig.7 Time-history curve of test section tunnel land subsidence

综上所述,试验段隧道洞内和地面各项监测数据波动均较小,实测水平收敛曲线在40 d内较为平稳,衬砌完成后的变形及稳定性完全满足地铁工程的要求。

4 结语

1) 青岛地铁硬岩隧道中的应用表明,通过严格控制施工工艺和作业流程,防水型单层衬砌的力学性能、抗渗性能、夹层黏结强度等均可满足地铁隧道的要求。

2) 防水型单层衬砌隧道的建设对地质超前预报、地层加固及隧道防排水等技术都提出了新的要求,只有进行隧道结构全体系技术的研究,才能为防水型单层衬砌的工程应用创造更好条件。

3) 防水型单层衬砌作为典型的叠合结构,应对其接触面的力学行为进行定量分析,明确围岩与衬砌之间、衬砌各层之间以及衬砌与喷涂防水层之间的相互作用,从而指导叠合衬砌结构的设计。

4) 对于地铁隧道等百年工程,还需对防水型单层衬砌材料在腐蚀条件下的耐久性进行研究,包括氯离子扩散、抗碳化、抗冻及抗硫酸盐侵蚀等方面。

参考文献

- [1] 黄舰. 青岛地铁区间隧道双护盾 TBM 地质适应性分析[J]. 现代隧道技术, 2016, 53(3): 42.
HUANG Jian. On the geological adaptability of the double-shield TBM for the Qingdao Metro tunnel[J]. Modern Tunnelling Technology, 2016, 53(3): 42.
- [2] 张强, 顾朝杰, 宋仕兵, 等. 青岛地铁 R3 线地质条件评价研究[J]. 都市快轨交通, 2017, 30(6): 74.
ZHANG Qiang, GU Zhaojie, SONG Shibing, et al. The geology evaluation on the Line R3 of Qingdao Metro[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2017, 30(6): 74.
- [3] 王星, 马建军. 硬岩地层中暗挖塔柱式地铁车站的应用研究[J]. 施工技术, 2017, 46(8): 60.
WANG Xing, MA Jianjun. Application of subsurface excavation tower column type subway stations in hard rock stratum[J]. Construction Technology, 2017, 46(8): 60.
- [4] 郭瑶. 地铁区间渡线段大跨无仰拱隧道设计研究[J]. 国防交通工程与技术, 2018, 16(3): 26.
GUO Yao. On the design and construction of a large-span non-inverted-arch metro tunnel of a junction line[J]. Traffic Engineering and Technology for National Defence, 2018, 16(3): 26.
- [5] 王建宇. 复合式衬砌若干问题探讨[J]. 现代隧道技术, 2019, 56(1): 1.
WANG Jianyu. Discussion on the composite shell lining[J]. Modern Tunnelling Technology, 2019, 56(1): 1.
- [6] 肖明清, 徐晨. 复合式衬砌隧道总安全系数设计法修正与应用研究[J]. 隧道建设(中英文), 2019, 39(3): 421.
XIAO Mingqing, XU Chen. Modification and application of design method for total safety factor of composite lining tunnel[J]. Tunnel Construction, 2019, 39(3): 421.
- [7] 刘明高, 高文学, 张为, 等. 钢纤维喷射混凝土及其在隧道工程中的应用[J]. 铁道建筑, 2006, 46(2): 43.
LIU Minggao, GAO Wenxue, ZHANG Wei, et al. Steel fiber shotcrete and its application in tunnel engineering[J]. Railway Engineering, 2006, 46(2): 43.
- [8] 王志杰. 喷射钢纤维混凝土及其在隧道和地下工程中的应用[J]. 公路, 2004, 49(1): 145.
WANG Zhijie. Steel fiber reinforced shotcrete and its application in tunnel and underground engineering[J]. Highway, 2004, 49(1): 145.
- [9] 龚彦峰, 张俊儒. 隧道单层衬砌设计方法研究及应用[J]. 岩土力学, 2011, 32(4): 1062.
GONG Yanfeng, ZHANG Junru. Study of design methodology and application of tunnel single layer lining[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(4): 1062.
- [10] 杜国平, 刘新荣, 李晓红, 等. 隧道单层衬砌结构稳定性现场试验及变形控制[J]. 重庆大学学报, 2013, 36(12): 79.
DU Guoping, LIU Xinrong, LI Xiaohong, et al. Field test and deformation controlling for single tunneling lining stability[J]. Journal of Chongqing University, 2013, 36(12): 79.
- [11] 胡磊, 王志杰, 何明磊, 等. 隧道钢纤维混凝土单层衬砌模型试验及数值模拟[J]. 铁道建筑, 2014, 54(6): 72.
HU Lei, WANG Zhijie, HE Minglei, et al. Model test and numerical simulation of steel fiber reinforced concrete single-layer lining of tunnel[J]. Railway Engineering, 2014, 54(6): 72.

(收稿日期:2020-12-21)

欢迎投稿《城市轨道交通研究》

投稿网址:tougao. umt1998. com