

地铁暗挖隧道无筋复合衬砌损伤加固试验研究^{*}

李宇杰¹, 徐会杰¹, 王梦恕², 宋国侠¹

(1.北京市地铁运营有限公司,北京 100044;2.北京交通大学 土建学院,北京 100044)

摘要:以北京地铁某线路复合衬砌结构裂缝病害为研究背景,采用室内模型试验方法开展对衬砌结构破坏规律和补强效果的研究。通过试验得出主要结论如下:(1)试验梁裂缝发展分为4个阶段,以试验荷载90 kN、120 kN、180 kN和350 kN为分界点。(2)芳纶纤维布补强试验梁的破坏试验显示,黏贴在试验梁下部的芳纶纤维布提升了试验梁的抗弯性能,其挠度由13 cm增加至18 cm;3 m的补强范围保证了试验梁在破坏时,芳纶纤维布的两边始终粘贴在试验梁下部,未出现拱顶掉块和直梁实验中常见的纤维布断裂破坏形式。(3)通过对比试验可以得出,芳纶纤维布补强不同损伤程度的试验梁可使其屈服荷载提高17%~39%,极限荷载提高46%~71%,对试验梁承载力提高明显。本文的研究结论对下一阶段的隧道衬砌结构裂缝病害综合治理工作具有重要的理论指导意义。

关键词:复合衬砌;芳纶纤维布;补强;模型试验

中图分类号:U457

文献标识码:A

文章编号:1673-0836(2018)06-1512-07

Reinforcing Test Study on Damage Unreinforced Composite Lining of Subway Bored Tunnel

Li Yujie¹, Xu Huijie¹, Wang Mengshu², Song Guoxia¹

(1. Beijing Mass Transit Railway Operation Co. Ltd., Beijing 100044, P.R.China; 2. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, P.R.China)

Abstract: Taking composite lining diseases of a Beijing subway line as research background, indoor model test method was used to studying lining structure damage rule and reinforcing effect. Through experiment, it was concluded the main conclusions as follows: (1) the crack propagation of test beam could be divided into four stages by test load demarcation point, which were 90 kN, 120 kN, 180 kN and 350 kN. (2) The damage test of aramid fiber cloth on reinforcing test beam showed that, the aramid fiber cloth paste on test beam bottom has improved the test beam bending performance, and the deflection increased from 13 cm to 18 cm. When the test beam damaged, the two side of 3 m long aramid fiber cloth always pasted on beam bottom, and never appeared chip off-falling and fiber cloth fracture damage forms, which was a common phenomenon on straight beam test. (3) Through the contrast test, when the aramid fiber cloth using different injured test beam, the yield load of test beams could increase by 17% ~ 39%, the ultimate load of test beams could increase by 46% ~ 71%, all the bearing capacity of test beams were obviously increased. The research conclusions have important theoretical guiding significance for the comprehensive treatment work on the tunnel lining structure cracks during the next phase.

Keywords: composite lining; aramid fiber cloth; reinforcing; model test

^{*} 收稿日期:2018-05-08(修改稿)

作者简介:李宇杰(1983-),男,山西五台人,博士后,高级工程师,主要从事运营轨道交通土建设施养护维修工作。

E-mail:liyujie3036119@163.com

基金项目:国家重点研发计划课题(2016YFB1200402)

0 引言

城市轨道交通地下结构中,衬砌裂缝是最为常见的病害之一。衬砌裂缝的形成受混凝土自身特性、车辆低频振动和周边环境荷载等因素影响明显。由于设计形式的不同,每条隧道的衬砌结构破坏形式也各不相同^[1-3]。相关研究资料显示,上海、深圳、天津、广州、南京等城市轨道交通地下结构均出现了衬砌裂缝、渗漏及掉块等各类结构性病害^[4-9]。而衬砌裂缝的产生及发展更是导致其他相关病害的根本原因。

北京地铁某线路为北京市轨道交通运营最重要的线路之一,其二次衬砌结构采用无钢筋素混凝土结构形式。当土层条件较好、荷载基本恒定时,隧道初衬结构完全承担地层荷载,二衬结构基本不承受地层荷载,仅作为储备结构。因此,可以采用无配筋形式,达到节省工程造价目的。隧道二衬结构无配筋形式在铁路山岭隧道和公路隧道中较为常见,但在城市轨道交通中却很少使用。随着使用年限的增加,采用二次衬砌无配筋形式的北京地铁某线路出现了较为严重的二次衬砌结构病害。病害以衬砌开裂为主,其中纵向裂缝占80%左右,拱顶纵向裂缝占40%左右,其最大裂缝宽度超过4 mm,单条裂缝最大长度超过100 m,对该线路开展隧道衬砌结构补强加固工作已迫在眉睫^[10]。考虑补强加固施工应尽量减少对地铁正常运营的影响,避免区间线缆的改移工作,拟采用纤维布补强加固方式。大量的纤维布补强加固试验研究均采用直梁形式,未考虑曲梁的变形效应和既有病害状态下的加固效果。因此,本文在仿真模拟的基础上^[10],采用最优补强加固方案(3层3 m宽的芳纶纤维布),并采用足尺模型试验方式,通过施加预载荷,造成试验梁具有一定初始损伤特性,在此基础上开展纤维布补强加固效果试验分析,从而最大限度地模拟现场真实情况。本文的研究成果可以为下一步的北京地铁某线路结构补强加固工作提供重要的设计依据,为类似隧道无钢筋二衬结构的补强加固工作提供参考依据,对构建北京“平安型地铁”^[11]、保障首都人民出行安全具有重要意义。

1 模型试验设计

1.1 试验梁设计

北京地铁某线路正线区间隧道结构均为复合衬砌结构,单洞单线马蹄形断面,区间结构断面如

图1所示,初衬为250 mm厚钢格栅喷射混凝土,二衬为300 mm厚素混凝土,局部区段二衬为钢筋混凝土结构。

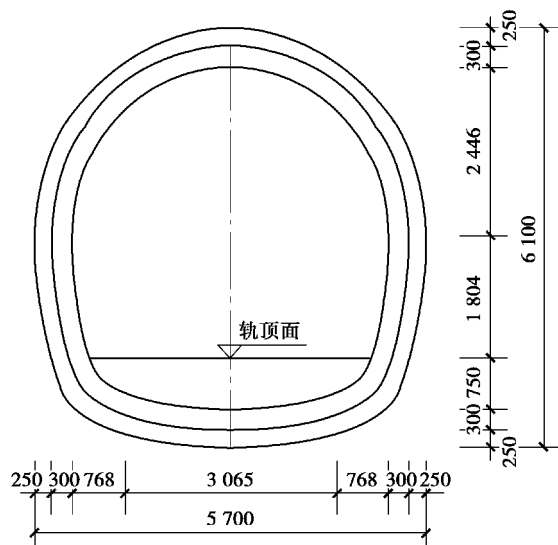


图1 隧道衬砌结构横断面图

Fig. 1 Cross-section profile of tunnel lining structure

按照隧道衬砌结构的设计要求,试验梁的比例采用隧道衬砌原型尺寸,受试验场地加载方式限制,试验梁仅模拟隧道上部拱型结构。试件的上部为300 mm厚钢格栅混凝土结构,下部为250 mm厚素混凝土结构。试件整体为180度半圆拱型,外径为3050 mm,内径为2500 mm。试件的截面尺寸 $b \times h = 400 \text{ mm} \times 550 \text{ mm}$,钢筋格栅的宽度为200 mm,两侧混凝土保护层厚度各为100 mm,跨度为6100 mm,净跨为5000 mm。

试验梁所用混凝土设计强度等级为C20普通硅酸盐水泥,粗骨料为粒径小于15 mm的碎石,细集料为河沙。混凝土的配合比水泥:水:砂:石=1:0.41:1.32:2.45。钢筋格栅由主筋、斜筋、箍筋及钢板组成,其中主筋与斜筋焊接连接、两块钢板由螺栓连接。钢筋均采用HRB335(20MnSi)钢,其中主筋直径 $\phi 22$,斜筋直径 $\phi 10$,箍筋直径 $\phi 6$,间距360 mm,钢板尺寸240 mm \times 10 mm \times 340 mm。

为便于试验梁的加载试验,分别设置试验梁加载平台(在试验梁拱顶外侧浇筑混凝土加载平台,平台宽度200 mm,高度50 mm)、试验梁支撑结构(在试验梁两侧拱架的外侧浇筑混凝土底座,底座向外延伸300 mm,高400 mm。两侧底座内各采用4根 $\phi 22$ 直径HRB335(20MnSi)钢连接到试验梁钢筋格栅上)、试验梁吊装结构(在试验梁两侧45°加装2个吊环,要求吊环根部与钢筋格栅相连,保

证其吊装强度)。在试验梁支撑结构底部铺装低摩擦橡胶垫,简化模拟隧道结构的侧向压力。试验梁设计图如图 2 所示。试验梁加载及试验设备如图 3 所示。

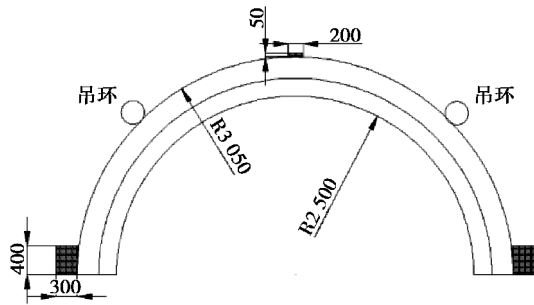


图 2 试验梁设计图

Fig. 2 Test beam design profile

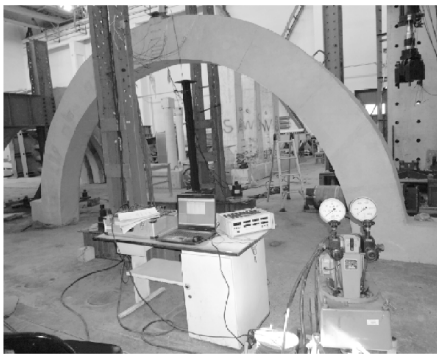


图 3 试验梁加载设备

Fig. 3 Test beam loading equipment

本次试验的试验目的主要是通过加固不同损伤状态下的足尺模型,再施加破坏荷载,得到不同损伤状态下加固试验梁的抗弯能力提高程度,从而为下一步现场治理工作提供设计依据。受试验场地和油压加载设备等限制,本次试验中对边界条件进行了简化,忽略了平面应力模型模拟平面应变问题的结果偏差,用集中荷载代替了实际的均布荷载。同时,为了规避试验风险(在持续加载状态下粘贴芳纶纤维布,并进行养护,存在试验梁突然失稳和油压加载设备突然损坏两种风险),试验过程中采用了卸载后加固的方式。

1.2 试验方案

本次试验目的主要为:①通过破坏试验获得衬砌结构的破坏规律;②通过补强技术试验获得衬砌结构的补强效果。

本次试验梁共制作 8 块,分别用于破坏试验及不同损伤状态下的芳纶纤维布补强试验。试验梁编号及损伤加固情况如表 1 所示。所有试验梁养护 28 d 后开展破坏试验。其中,补强试验梁补强

施工完成后,在试验室继续养护一周,补强材料强度达到设计要求后开展破坏试验。

表 1 试验梁编号及损伤补强情况表

Table 1 Test beam number and damage reinforcement situation

编号	损伤级别	结构补强方式
BM-1	未损伤	未补强
BM-2	未损伤	未补强
BM-3	未损伤	未补强
BM-4	未损伤	粘贴 3 层 3 m 宽芳纶纤维布
BM-5	主裂缝宽度达 1 mm 后,卸载加固	粘贴 3 层 3 m 宽芳纶纤维布
BM-6	主裂缝宽度达 1.5 mm 后,卸载加固	粘贴 3 层 3 m 宽芳纶纤维布
BM-7	主裂缝宽度达 2 mm 后,卸载加固	粘贴 3 层 3 m 宽芳纶纤维布
BM-8	主裂缝宽度达 2.5 mm 后,卸载加固	对主裂缝先进行灌浆加固,然后粘贴 3 层 3 m 宽芳纶纤维布

1.3 损伤级别设计

根据试验目的,本次试验的加固梁在加固前,首先应施加荷载,使其损伤开裂。其中损伤荷载的大小是根据 BM-1、BM-2、BM-3 号梁(即对比梁)的钢筋应变来确定的。对比梁的试验中发现,钢筋应变在 2 000 $\mu\epsilon$ 左右时达到屈服,试验梁主裂缝的宽度与主筋应变有较好的比例关系,结合地铁公司的现行维护规范,本次试验将主裂缝的宽度分为几个等级来确定相应的损伤荷载,具体参见表 2。

表 2 试验梁损伤级别

Table 2 Test beam damage grade

编号	损伤级别	对应钢筋应变 $\mu\epsilon$	$\frac{\epsilon_s}{\epsilon_q}/\%$
BM-5	主裂缝宽度 1 mm	700~800	37.5
BM-6	主裂缝宽度 1.5 mm	950~1 050	50
BM-7	主裂缝宽度 2 mm	1 350~1 450	70
BM-8	主裂缝宽度 2.5 mm	1 700~1 800	87.5

2 试验结果与分析

2.1 对比试验梁结果分析

2.1.1 试验梁破坏分析

试验梁的最终破坏形式为两侧拱脚及拱顶上部混凝土的压碎破坏、试验梁中钢筋的屈服破坏。试验梁的裂缝发展分为4个阶段,第一阶段为试验荷载达90 kN时,试验梁拱中央混凝土下缘主裂缝产生;第二阶段为试验荷载达120 kN时,试验梁两侧拱腰处混凝土上缘裂缝产生;第三阶段为试验荷载达180 kN时,试验梁两侧拱腰至拱脚微裂缝产生;第四阶段为试验荷载达350 kN时,试验梁拱中央及两侧拱腰处混凝土压碎,拱中央及两侧拱腰处出现与纵向裂缝相交叉的横向裂缝。

试验加载前期(0~90 kN):试验梁内大部分钢筋处于受拉状态;试验梁的中和轴在截面中部附近,但随着荷载的增大,中和轴逐步向受压区移动,这些都与梁的实际受力情况一致。

试验加载中期(90~180 kN):试验荷载达到120 kN左右时,两侧拱腰的上缘位置出现裂缝(该隧道衬砌的结构设计中,两侧拱腰处为分段钢格栅的链接位置,由两片钢板通过螺栓进行连接,附近的混凝土材料不连续,该位置的整体抗拉强度较低,为整个结构的薄弱环节),试验梁左右两侧拱腰至拱脚的混凝土上缘开始出现多条微裂缝,两条裂缝的纵向间隔大约为30 cm,但是随着荷载的增加,这些微裂缝的宽度变换不大,最终宽度均不超过0.2 mm;主筋基本处于弹性变形阶段,主裂缝的宽度与主筋的应力基本呈线性变换。

试验加载后期(180~350 kN 集中荷载):试验荷载达到180 kN左右时,主筋进入屈服阶段,主裂缝的宽度与主筋的应力非线性变换;试验梁的主裂缝快速发展并贯穿了大部分梁高度,裂缝的顶端和末端开始出现分叉现象,加载时有微小的脆响声出现。试验荷载加载到最后阶段,两侧拱脚、拱顶上部混凝土的压碎破坏,主裂缝附近的钢筋应力均超出极限强度范围,部分箍筋及斜筋的应力由受拉转为受压(钢筋的焊接点可能已被拉开)。最终,试验梁中央的主裂缝宽度达到6~8 mm,两侧拱腰处上缘混凝土的裂缝宽度达到2~3 mm,拱腰至拱脚的上缘混凝土微裂缝宽度不超过0.2 mm。破坏时,拱顶的最大挠度达13 mm。

通过试验梁的破坏形式可以看出,在加载初期,拱形试验梁的受力形式可以简化为以两侧拱脚

为支座的简支梁结构,拱中央为最大正弯矩部位,试验梁内无负弯矩;在加载中后期,其受力形式可以简化为以两侧拱腰位置为铰支点的三段梁结构,此时,拱中央依然为最大正弯矩部位,两侧拱腰处为最大负弯矩部位。

试验梁破坏后裂缝如图4所示。

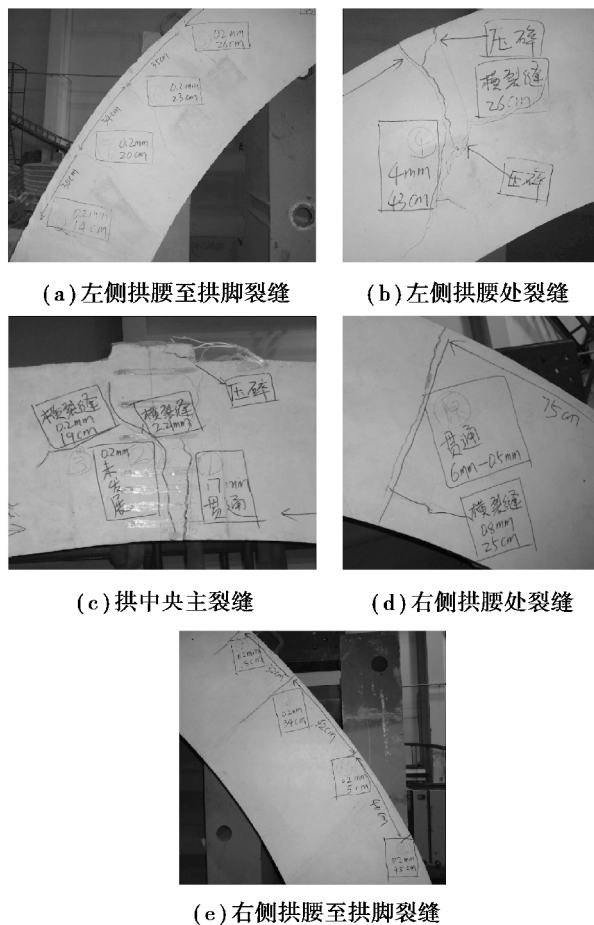


图4 对比试验梁破坏特性

Fig. 4 Contrast test beam damage characteristics

2.1.2 受力分析

对比试验梁内最大受力筋应变与荷载关系图如图5所示。由图5可知,在整个加载过程中,钢筋的应变出现两次突变,分别是梁开裂与超出极限两个瞬间,可以通过记录钢筋的突变点来确定梁的开裂荷载与极限荷载。试验加载初期,钢筋应变较小,混凝土主要承受拉应力。试验荷载在90~100 kN范围内,钢筋应变出现第一次突变,说明此时梁已开裂,随着梁的开裂,钢筋应变的增长为线性趋势。试验荷载达120 kN时,钢筋应变的线性趋势发生轻微变化,此时试验梁两侧拱腰位置出现裂缝。试验荷载在160~180 kN范围内,钢筋应变接近2000,曲线出现平滑段,钢筋屈服。试验荷载

达到 240 kN 左右时,钢筋应变第二次突变,随着荷载增大,钢筋应变急速下降,钢筋已经超出极限荷载,并被拉断。

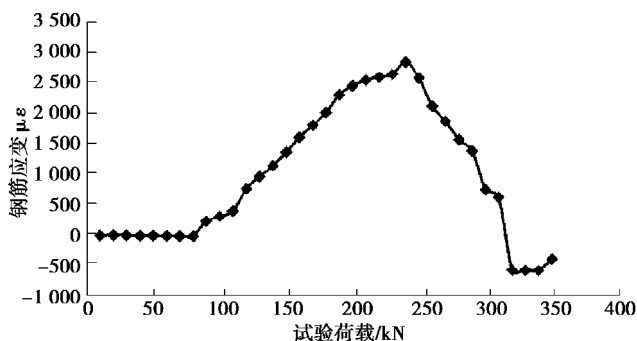


图5 对比试验梁最大受力筋应变与荷载关系图

Fig. 5 The strain and load diagram of the maximum force reber on contrast test beam

2.2 芳纶纤维布补强试验梁结果分析

2.2.1 梁破坏分析

本次试验采用芳纶纤维布,对损伤情况为 BM-4(0 mm)、BM-5(1 mm)、BM-6(1.5 mm)、BM-7(2 mm)及 BM-8(2.5 mm)5 种情况进行了补强破坏试验。芳纶纤维布补强后试验梁如图 6 所示。



图6 芳纶纤维布补强试验梁

Fig. 6 Test beam reinforcing by aramid fiber cloth

芳纶纤维布补强试验梁的破坏过程如下:

补强试验梁最终的破坏形式主要为芳纶纤维布与试验梁混凝土表面的脱开(如图 7 所示)、两侧拱脚及拱顶上部混凝土的压碎及试验梁中钢筋的屈服破坏。试验梁的裂缝发展分为 4 个阶段,第一阶段为试验荷载 90~100 kN 时,试验梁拱中央主裂缝产生;第二阶段为试验荷载 180~200 kN 时,加固梁的左侧拱腰微裂缝产生;第三阶段为试验荷载 210~250 kN 时,加固梁的裂缝快速发展;第四阶段为试验荷载 350~410 kN 时,试验梁拱中央及两侧拱腰处混凝土压碎,拱中央及两侧拱腰处出现与纵向裂缝相交叉的横向裂缝。

在试验荷载前期(0~90 kN):由于试验梁损伤后,混凝土出现裂缝,导致试验梁内钢筋无法完全



图7 芳纶纤维布补强试验梁破坏特征

Fig. 7 Damage characteristics of test beam reinforcing by aramid fiber cloth

恢复至零荷载状态,裂缝附近钢筋的应变为正,其他部位的大部分斜筋、箍筋处于受拉状态。随着荷载的增大,主裂缝附近的主筋及斜筋的应力缓慢增大;试验荷载达到 90 kN 左右时,梁的拱中央部位下缘混凝土开始出现新裂缝(BM-4)或旧裂缝宽度开始增加(BM-5、BM-6、BM-7、BM-8)。

在试验荷载中期(90~250 kN):试验荷载达到 180 kN 左右时,BM-5、BM-6、BM-7、BM-8 试验梁的两侧拱腰的上缘位置出现裂缝,试验梁左右两侧拱腰至拱脚的混凝土上缘开始出现多条微裂缝;试验荷载达到 200 kN 左右时,BM-4 试验梁的两侧拱腰的上缘位置出现裂缝,试验梁左右两侧拱腰至拱脚的混凝土上缘开始出现多条微裂缝,这些位置的微裂缝随着荷载的增加,裂缝宽度变换不大,最终宽度均不超过 0.2 mm;裂缝的宽度随着荷载的增大不断增加;主筋基本处于弹性变形阶段,主裂缝的宽度与主筋的应力基本呈线性变换。同时,试验荷载达到 180 kN 左右时,试验梁的芳纶纤维布与混凝土表面开始脱开。BM-4、BM-5、BM-6、BM-7、BM-8 分别在 250 kN、230 kN、220 kN、210 kN、210 kN 荷载时,其钢筋达到屈服极限。

在试验荷载后期(250~460 kN):主筋进入屈服阶段,主裂缝的宽度与主筋的应力非线性变换;试验梁的主裂缝快速发展并穿过了大部分梁高度,裂缝的顶端和末端开始出现分叉现象,芳纶纤维布与混凝土表面的脱开范围增加。BM-4、BM-5、BM-6、BM-7、BM-8 分别在 410 kN、380 kN、360 kN、350 kN、360 kN 荷载时,其钢筋达到极限破坏强度,随着荷载的增加,钢筋应力快速下降。试验荷载加载到最后阶段,两侧拱脚混凝土、拱顶上部混凝土的压碎,主裂缝附近的钢筋应力均超出极限强度范围,芳纶纤维布与混凝土表面脱开,脱开高度达 4 cm 以上,脱开区域为 0.8~1.8 m。最终,试验梁在

原有损伤的基础上,其中央的主裂缝宽度达到 11~12 mm,两侧拱腰处上缘混凝土的裂缝宽度达到 0.2~1 mm,拱腰至拱脚的上缘混凝土微裂缝宽度不超过 0.2 mm。破坏时,拱顶的挠度范围为 14~18 mm。

芳纶纤维布补强试验梁的破坏形式可以看出,混凝土下缘的芳纶纤维布如同一层钢筋,增加了试验梁下部的抗拉性能,整个试验梁的抗弯性能提高明显,挠度由 13 cm 提高至 18 cm;芳纶纤维布 3 m 的补强范围保证了试验梁最终破坏时,芳纶纤维布的两边始终粘贴在混凝土内表面上,不会出现拱顶掉块的危险;隧道拱形结构的设计形式使得结构向下变形时,产生相应的水平力,减小梁内的竖向力。因此,试验梁混凝土压碎破坏时,芳纶纤维布与混凝土表面脱开,而没有出现大多数直梁试验中纤维布断裂的破坏形式。

2.2.2 受力分析

芳纶纤维布补强试验梁的主筋应变与试验荷载的关系图如图 8 所示。由图 8 可以看出,在整个加载过程中,相对于对比试验梁,芳纶纤维布补强试验梁内主筋应变也经历两次突变,分别是梁开裂与超出极限两个瞬间。未加固梁与加固梁开裂的荷载大致相同,但是芳纶纤维布补强试验梁的极限荷载则明显增大。由于在原有损伤的基础上,在加载的初期(即梁还未开裂时),加固梁钢筋的应变是正值,混凝土已经存在裂缝,钢筋主要承受拉应力。试验荷载在 90~100 kN 范围内,钢筋应变有一次突变,此时梁已开裂,随着梁的开裂,钢筋应变开始增长。加固梁的试验荷载在 210~250 kN 范

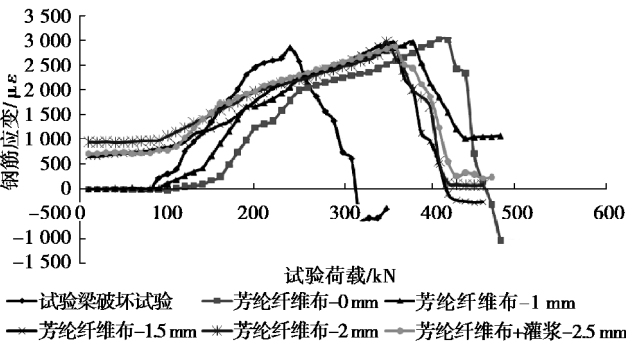


图 8 芳纶纤维布补强试验梁最大主筋应变与荷载关系图

Fig. 8 The strain and load diagram of the maximum force reber on test beam reinforcing by aramid fiber cloth

围内,钢筋应变接近 2 000,曲线出现平滑段,梁已经屈服。试验荷载达到 350~430 kN 范围内,钢筋应变出现第二次突变,钢筋应变随着荷载增大急速下降,加固试验梁钢筋已经超出极限荷载。

芳纶纤维布补强试验梁抗弯能力汇总情况如表 3 所示。由表 3 可知,芳纶纤维布补强不同损伤程度的试验梁可使试验梁的屈服荷载提高 17%~39%,极限荷载提高 46%~71%。

表 3 芳纶纤维布补强试验梁抗弯能力汇总

试验梁编号	屈服荷载/kN		极限荷载/kN	
	试验值	提高程度 /%	试验值	提高程度 /%
BM-1	180		240	
BM-2	180		240	
BM-3	180		240	
BM-4	250	39	410	71
BM-5	230	28	380	58
BM-6	220	22	360	50
BM-7	210	17	350	46
BM-8	210	17	360	50

3 结论

针对地铁某线路衬砌结构病害开展了 1:1 模型破坏试验的试验。通过试验,得出主要结论如下:

(1) 试验梁裂缝发展分为 4 个阶段,第一阶段为试验荷载达 90 kN 时,拱中央下缘主裂缝产生;第二阶段为试验荷载达 120 kN 时,两侧拱腰处混凝土上缘裂缝产生;第三阶段为试验荷载达 180 kN 时,两侧拱腰至拱脚微裂缝产生;第四阶段为试验荷载达 350 kN 时,拱中央及两侧拱腰处出现与纵向裂缝相交叉的横向裂缝,混凝土压碎。

(2) 芳纶纤维布补强试验梁的破坏试验说明,混凝土下缘的芳纶纤维布增加了试验梁的抗弯性能,挠度由 13 cm 增加至 18 cm;3 m 的补强范围保证了试验梁破坏时,芳纶纤维布的两边始终粘贴在混凝土内表面上,未出现拱顶掉块危险,没有出现直梁试验中纤维布断裂的破坏形式。

(3)相对于对比试验梁,芳纶纤维布补强不同损伤程度的试验梁可使试验梁的屈服荷载提高17%~39%,极限荷载提高46%~71%,其对试验梁承载力提高明显。

参考文献(References)

- [1] 王梦恕,谭忠盛.中国隧道及地下工程修建技术[J].中国工程科学,2010,12(12):4-10. (Wang Mengshu, Tan Zhongsheng. The construct technology of tunnel and underground engineering in China [J]. Engineering Science, 2010, 12(12): 4-10. (in Chinese))
- [2] 关宝树.隧道加固维修手册[R].成都:西南交通大学,1994. (Guan Baoshu. Tunnel maintenance manuals [R]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 1994. (in Chinese))
- [3] 胡怡东.EAA 环氧材料在广州地铁1号线整体道床病害治理中的应用[J].城市轨道交通研究,2005,8(6):75-77. (Hu Yidong. Application of epoxy stuff in Guangzhou metro line 1 for renovation of concrete trackbed [J]. Urban Mass Transit, 2005, 8(6): 75-77. (in Chinese))
- [4] 余健,何川.隧道二次衬砌病害通用处治方法研究[J].中国铁道科学,2005,26(1):25-30. (Yu Jian, He Chuan. General treatment methods for secondary lining defect of tunnels [J]. China Railway Science, 2005, 26(1): 25-30. (in Chinese))
- [5] 彭立敏,覃长炳,施成华,等.铁路隧道基底病害整治现场试验研究[J].中国铁道科学,2005,26(2):39-43. (Peng Limin, Qing Changbing, Shi Chenghua. Field test study on the disease treatment of foundation base in railway tunnel [J]. China Railway Science, 2005, 26(2): 39-43. (in Chinese))
- [6] 康涛,胡斌,刘传新,等.槽箐头隧道病害机理分析及治理方案研究[J].地下空间与工程学报,2013,9(增2):2019-2023. (Kang Tao, Hu Bing, Liu Chuanxin. Disease mechanism analysis and treatment program of caojingtou tunnel [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013, 9 (Supp. 2): 2019-2023. (in Chinese))
- [7] 刘海京,夏才初,朱合华,等.隧道病害研究现状与进展[J].地下空间与工程学报,2007,3(5):947-953. (Liu Haijing, Xia Caichu, Zhu Hehua. Studies on tunnel damage [J]. Chinese Journal of Underground Space And Engineering, 2007, 3 (5): 947-953. (in Chinese))
- [8] 李养平.天津地铁1号线既有有线轨道结构病害整治方案研究[J].铁道建筑,2004(7):72-74. (Li Yangping. Study on treatment scheme of defects in track structure on existing No. 1 line of Tianjin metro [J]. Railway Engineering, 2004(7): 72-74. (in Chinese))
- [9] 李宇杰,王梦恕,徐会杰,等.纤维布补强地铁隧道结构的数值分析[J].土木工程学报,2014,47(8):138-144. (Li Yujie, Wang Mengshu, Xu Huijie, et al. Fiber cloth reinforcing numerical analysis of metro tunnel structure [J]. Journal of Civil Engineering, 2014, 47 (8): 138-144. (in Chinese))
- [10] 李宇杰,王梦恕,徐会杰,等.碳纤维布加固矿山法地铁隧道衬砌结构模拟研究[A].//2013中国城市轨道交通关键技术论坛[C].2013:328-333. (Li Yujie, Wang Mengshu, Xu Huijie, Jiang liang. Simulation study of carbon fiber cloth in reinforcement of tunnel lining structure on mine construction subway [A]//CEABM 2013:328-333. (in Chinese))
- [11] 谢正光.建设“六型地铁”进一步提升北京地铁运营服务水平[J].都市快轨交通,2012,25(5):17-21. (Xie Zhengguang. Build "Six-type" Beijing subway to enhance its operation and service level [J]. Urban Rapid Rail Transit, 2012, 25 (5): 17-21. (in Chinese))
- [12] 李宇杰,王梦恕,徐会杰,等.已有裂缝病害的地铁区间隧道衬砌结构受力分析[J].中国铁道科学,2014,35(3):64-69. (Li Yujie, Wang Mengshu, Xu Huijie. Force analysis of lining structure for subway tunnel with crack disease [J]. China Railway Science, 2014, 35 (3): 64-69. (in Chinese))
- [13] 李宇杰,何平,秦东平,等.基于混凝土弹塑性损伤本构模型的盾构管片受力分析[J].中国铁道科学,2012,33(1):47-53. (Li Yujie, He Ping, Qin Dongping. Force analysis of segment for shield tunnel based on elastoplastic damage constitutive model of concrete [J]. China Railway Science, 2012, 33(1): 47-53. (in Chinese))