

玄武岩筋混凝土桥面铺装试验研究

张 海¹, 李彩芸², 赵子豪¹, 张 伟¹

(1. 沈阳建筑大学交通与测绘工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 内蒙古敖汉旗住房保障服务中心, 内蒙古 赤峰 024300)

摘 要 目的 研究玄武岩筋替换桥面铺装层中传统钢筋的抗弯性能, 为该类加铺玄武岩筋混凝土铺装层提供参考。方法 笔者制作了7根玄武岩筋混凝土桥面铺装试验梁和3根普通钢筋混凝土梁对其进行四点加载试验, 研究钢筋直径、数量以及铺装层厚度等对试验梁抗弯性能的影响。结果 只改变铺装层纵筋类型, 铺装层纵筋为玄武岩筋的矩形梁屈服荷载提高了1.23%~8.96%, 抗弯承载力提高了0.6%~2.65%; 相同筋材类型, 随着钢筋直径增大到10 mm, 普通钢筋混凝土梁的抗弯承载力提高了13.86%, 玄武岩筋混凝土梁的抗弯承载力提高了16.17%; 铺装层纵筋数量的改变, 对梁的开裂荷载、抗弯承载力的作用较小; 只增加铺装层厚度, 玄武岩筋混凝土桥面铺装试验梁开裂荷载最大提高了50%, 屈服荷载最大提高了14.47%, 极限荷载最大提高了11.43%。结论 在一定的铺装层厚度和纵筋根数条件下, 将铺装层中玄武岩筋代替普通钢筋, 不仅可以发挥玄武岩筋抗腐蚀的特点, 还能提高抗弯承载力。

关键词 玄武岩筋; 铺装层; 混凝土; 荷载试验; 抗弯承载力

中图分类号 TU317

文献标志码 A

引用格式: 张海, 李彩芸, 赵子豪, 等. 玄武岩筋混凝土桥面铺装试验研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2024, 40(3): 470-477. (ZHANG Hai, LI Caiyun, ZHAO Zihao, et al. Experimental study on concrete deck pavement with basalt reinforcement[J]. Journal of Shenyang jianzhu university(natural science), 2024, 40(3): 470-477.)

Experimental Study on Concrete Deck Pavement with Basalt Reinforcement

ZHANG Hai¹, LI Caiyun², ZHAO Zihao¹, ZHANG Wei¹

(1. School of Transportation and Geomatics Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. Inner Mongolia Aohan Banner Housing Security Service Center, Chifeng, China, 024300)

Abstract: To investigate the flexural behavior of basalt reinforcement replacing traditional steel bars in bridge deck pavement layers, and to provide reference for this type of reinforced concrete pavement layer with basalt reinforcement. Both 7 basalt reinforced concrete bridge deck pavement

收稿日期: 2023-05-20

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52378357)

作者简介: 张海(1972—), 男, 副教授, 博士, 主要从事桥梁结构设计理论等方面研究。

test beams and 3 ordinary reinforced concrete beams were prepared by conducting four point loading tests, to study the effects of steel bar diameter, quantity, and pavement layer thickness on the flexural behavior of the test beams. By only changing the type of longitudinal reinforcement in the pavement layer, the yield load of rectangular beams with basalt reinforcement in the pavement layer increased by 1.23% ~ 8.96%, and the flexural bearing capacity increased by 0.6% ~ 2.65%. For the same reinforcement type, the flexural capacity of ordinary reinforced concrete beams increases by 13.86%, and the flexural capacity of basalt reinforced concrete beams increases by 16.17% as the steel bar diameter increased to 10mm. The change in the number of longitudinal bars in the pavement layer has a relatively small effect on the cracking load and flexural capacity of the beam. By only increasing the thickness of the pavement layer, the maximum cracking load of the basalt reinforced concrete bridge deck pavement test beam increased by 50%, the maximum yield load increased by 14.47%, and the maximum ultimate load increased by 11.43%. Under certain conditions of pavement thickness and the number of longitudinal bars, replacing ordinary steel bars with basalt bars in the pavement layer can not only enhance the corrosion resistance of basalt bars, but also improve their flexural capacity.

Key words: basalt reinforcement; pavement layer; concrete; load test; flexural capacity

桥面铺装层是直接承受车轮荷载作用的多向受力结构体系,也是参与主梁结构变形的重要组成部分,满足桥梁在使用过程中的功能性要求^[1-2]。随着桥梁建设行业的飞速发展,部分铺装层在原有设计使用期限内便发生了各种类型的损坏^[3-5]。所以国内外对此进行了大量研究,包括沥青混凝土设计、防水粘结层研究、钢桥铺装材料类型等^[6-9],但对桥面铺装层的受力研究较少,更缺少玄武岩筋(Basalt Fiber Reinforced Plastics, BFRP)混凝土桥面铺装层试验的相关规范,使得刚性铺装层的分析缺少理论依据。

以玄武岩纤维加树脂形成的复合筋具有抗拉强度高、自重轻、耐腐蚀、混凝土结合度应力低、握裹性好等优点^[10-16],适用于桥面水泥混凝土铺装层,配筋水泥混凝土路面中替代普通钢筋,尤其是耐腐蚀的特点可使其广泛应用于含氯化物的环境中^[17-19],从而有效解决北方季冻区盐腐、冻融等现象引起的钢筋锈蚀问题,以提高桥梁的耐久性,延长其使用寿命。另外,在施工过程中还可以避免传统钢筋需大量搭接的问题,降低运营和养护成本,缩短工期,具有良好的经济效益和

社会效益^[20]。笔者采用试验室加载模型梁的方式,对普通钢筋与玄武岩筋的受力特性进行研究,在加载过程中分析梁体挠度、筋材的应力应变、裂缝开展情况等变化规律。

1 试 验

1.1 试件制作

试验共预制 10 根混凝土梁,梁长度为 4 000 mm,底部受拉纵筋为 8 Φ 12、HRB400 级钢筋,架立钢筋为 8 Φ 6,箍筋为 Φ 6@112、 Φ 6@224,混凝土设计强度等级为 C40,梁体截面宽 \times 高为 460 mm \times 230 mm。在预制的缩尺矩形梁上浇筑不同参数的铺装层,配筋参数见表 1。试验梁尺寸和配筋见图 1。

1.2 加载装置及加载方案

试验梁采用四点加载方式,通过反力架利用千斤顶分级加载。为避免加载过程中因受单向集中力作用而产生应力集中现象,在试验梁跨中两侧分别放置铰支座,在支座上方放置矩形分配梁;分配梁上方放置量程为 1 000 kN 的压力式传感器,来读取每级加载力的大小,试验梁两端分别放置铰支座和滑动支座。

表1 试验梁设计参数

Table 1 Design parameters of test beams

试件编号	铺装层厚/mm	铺装层纵筋类型	铺装层纵筋直径/mm	铺装层纵筋间距/mm
SLP-6-80-4	80	钢筋	6	125
SLP-8-80-4	80	钢筋	8	125
SLP-10-80-4	80	钢筋	10	125
BLP-6-80-4	80	BFRP 筋	6	125
BLP-8-80-4	80	BFRP 筋	8	125
BLP-10-80-4	80	BFRP 筋	10	125
BLP-8-60-4	60	BFRP 筋	8	125
BLP-8-100-4	100	BFRP 筋	8	125
BLP-8-80-5	80	BFRP 筋	8	100
BLP-8-80-3	80	BFRP 筋	8	150

注:S 代表钢筋;B 代表玄武岩筋;L 代表梁体;P 代表铺装层。以 SLP-6-80-4 为例,表示铺装层纵向钢筋为普通钢筋,铺装层钢筋直径为 6 mm,铺装层厚度 80 mm,铺装层纵筋根数 4 根。

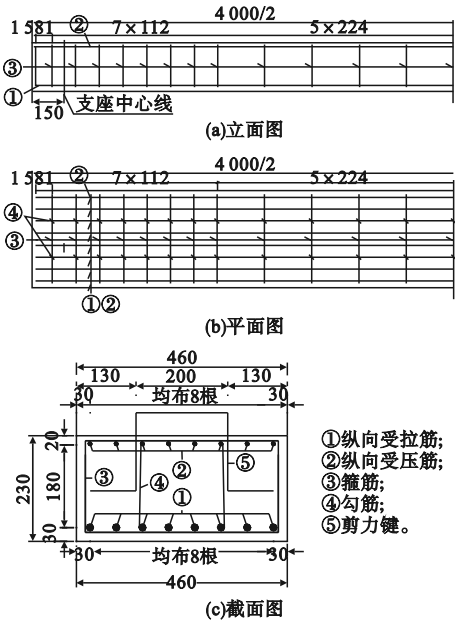


图1 试验梁配筋图

Fig. 1 Test beam reinforcement drawing

依据《混凝土结构试验方法标准》(GB/T 50152—2012)^[21],对玄武岩筋混凝土桥面铺装试验梁进行分级加载。正式加载前对试件进行三级预加载,以极限荷载预估值的 5% 为一级荷载,确认所有仪器工作正常后卸载至零,当加载至梁体开裂,以试验梁极限荷载预估值的 3% 为一级荷载,直至试验梁发生受弯破坏^[22-23]。试验加载装置见图 2。



图2 试验加载装置

Fig. 2 Test loading device

2 试验结果与分析

2.1 破坏形态

2.1.1 试验梁 BLP-6-80-4、SLP-6-80-4

梁 BLP-6-80-4 与梁 SLP-6-80-4 在加载前期,因施加荷载小试验梁内应力较小,梁底未出现裂缝;当荷载分别达到 43 kN、38 kN 时,纯弯段出现第一条裂缝,裂缝均由梁底产生,几乎与梁体纵向轴线相垂直,裂缝宽度均在 0.04 mm 左右,随着荷载的增大裂缝条数不断增多,当荷载分别增加到 146 kN、134 kN 时,弯剪段出现斜裂缝并逐渐向加载点处延伸,原有裂缝高度和宽度又进一步增大,试验梁 BLP-6-80-4 和试验梁 SLP-6-80-4 最大裂缝宽度分别为 0.15 mm、0.4 mm,随着荷载的继续增大,荷载值分别达到 167 kN、166 kN 时,两片梁均达到极限

承载力,在两加载点中间出现最大裂缝,最大裂缝宽度均为3.0 mm,裂缝主要集中在纯弯段。试验梁 BLP-6-80-4、SLP-6-80-4 的破坏形态如图3所示。

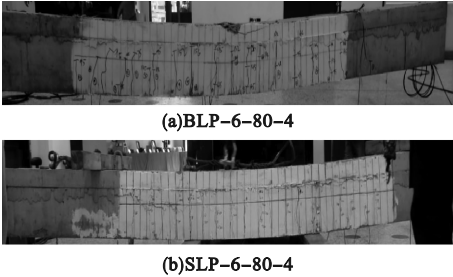


图3 试验梁 BLP-6-80-4、SLP-6-80-4 破坏形态
Fig.3 Failure state of specimens BLP-6-80-4 and SLP-6-80-4

2.1.2 试验梁 BLP-8-80-4、SLP-8-80-4

当梁 BLP-8-80-4 与梁 SLP-8-80-4 施加荷载分别达到42 kN、45 kN 时,出现第一条竖向裂缝,最大裂缝宽度均在0.04 mm 左右,裂缝长度在100~120 mm,集中于矩形梁的纯弯段;随着荷载进一步增加,试验梁裂缝的数量剧增且发展较为迅速,当荷载值分别达到154 kN、145 kN 时,矩形梁的纵向受拉钢筋达到屈服强度,原有裂缝高度和宽度又进一步增大,裂缝条数趋于平稳,梁 BLP-8-80-4 和梁 SLP-8-80-4 最大裂缝宽度分别为0.31 mm、0.25 mm,随着继续施加荷载,荷载值分别达到180 kN、177 kN 时,两片梁达到极限承载力,最大裂缝宽度分别为4.0 mm、3.0 mm,裂缝均主要集中在纯弯段。试验梁 BLP-8-80-4、SLP-8-80-4 破坏形态如图4所示。

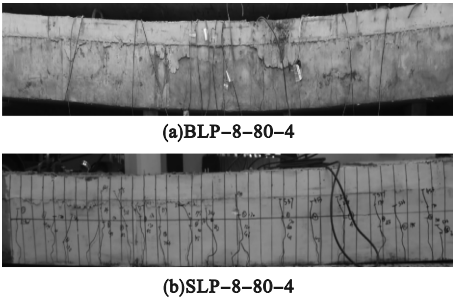


图4 试验梁 BLP-8-80-4、SLP-8-80-4 破坏形态
Fig.4 Failure state of specimens BLP-8-80-4 and SLP-8-80-4

2.1.3 试验梁 BLP-10-80-4、SLP-10-80-4

当荷载分别达到43 kN、45 kN 时,梁 BLP-10-80-4 与梁 SLP-10-80-4 发生开裂,这些竖向裂缝均由梁底产生,几乎与梁体纵向轴线相垂直,最大裂缝宽度均在0.04 mm 左右,裂缝长度在50~200 mm,集中于矩形梁的纯弯段;随着荷载的增大裂缝条数不断增多,当荷载值分别达到165 kN、163 kN 时,矩形梁的纵向受拉钢筋达到屈服强度,梁 BLP-10-80-4 和梁 SLP-10-80-4 最大裂缝宽度分别为0.2 mm、0.35 mm,随着荷载继续增大,纯弯段出现细微小裂缝,底部混凝土开始出现剥离,当荷载值分别达到194 kN、189 kN 时,两片梁均达到极限承载力,最大裂缝宽度均为3.1 mm,裂缝均主要集中在纯弯段。试验梁 BLP-10-80-4、SLP-10-80-4 破坏形态如图5所示。

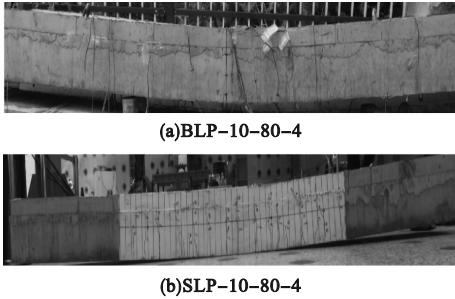


图5 试验梁 BLP-10-80-4、SLP-10-80-4 破坏形态
Fig.5 Failure state of specimens BLP-10-80-4 and SLP-10-80-4

2.1.4 试验梁 BLP-8-100-4、BLP-8-60-4

梁 BLP-8-100-4 与梁 SLP-8-60-4 在加载前期,因施加荷载小试验梁内应力较小,梁底未出现裂缝;当荷载分别达到51 kN、34 kN 时,纯弯段开始出现裂缝,裂缝均由梁底产生,几乎与梁体纵向轴线相垂直,随着荷载分别增大到60 kN、43 kN 时裂缝条数不断增多,当施加荷载分别增加到172 kN、152 kN 时,裂缝的条数基本平稳,最大裂缝宽度分别为0.48 mm、0.3 mm,随着荷载的继续增大,荷载值分别达到175 kN、172 kN 时,纯弯段枝状微裂缝开始增多,荷载值分别

达到 195 kN、175 kN 时,两片试验梁无法承受荷载,最大裂缝宽度分别为 2.5 mm、3.5 mm,试验梁 BLP-8-100-4、BLP-8-60-4 破坏形态如图 6 所示。

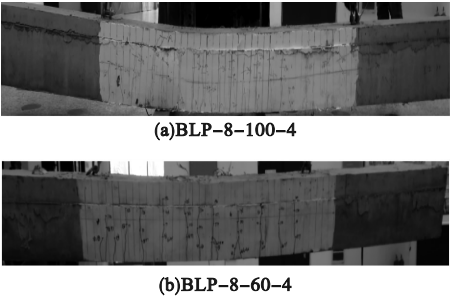


图 6 试验梁 BLP-8-100-4、BLP-8-60-4 破坏形态
Fig. 6 Failure state of specimens BLP-8-100-4 and BLP-8-60-4

2.1.5 试验梁 BLP-8-80-5、BLP-8-80-3

当荷载分别达到 30 kN、35 kN 时,梁 BLP-10-80-4 与梁 SLP-10-80-4 发生开裂,这些竖向裂缝均由梁底产生,几乎与梁体纵向轴线相垂直,最大裂缝宽度分别为 0.04 mm、0.02 mm,裂缝长度在 110 ~ 120 mm,集中于矩形梁的纯弯段,随着荷载的增大裂缝条数不断增多,当荷载值分别达到 136 kN、100 kN 时,裂缝处于稳定发展阶段,当荷载值分别达到 159 kN、150 kN 时,矩形梁的纵向受拉钢筋达到屈服强度,当荷载值分别达到 179 kN、168 kN 时,两片梁均达到极限承载力,最大裂缝宽度分别为 2.4 mm、2.8 mm。试验梁 BLP-8-80-5、BLP-8-80-3 破坏形态如图 7 所示。

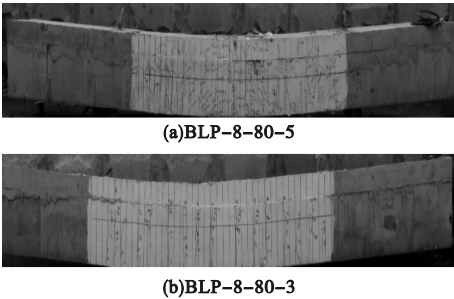


图 7 试验梁 BLP-8-80-5、BLP-8-80-3 破坏形态
Fig. 7 Failure state of specimens BLP-8-80-5 and BLP-8-80-3

2.2 裂缝形态

所有试验梁均为适筋梁弯曲破坏,笔者以试验梁 SLP-10-80-4 为例进行分析,其裂缝分布如图 8 所示,分布特点如下:在加载过程中,当混凝土梁底部发生开裂后,裂缝处的混凝土退出工作,钢筋应力急速增加,并且通过粘结力向未开裂的混凝土传递拉应力;随着荷载的逐渐增加,试验梁纯弯段开始出现竖向裂缝;当钢筋屈服后,混凝土裂缝宽度、裂缝高度随之发展,受压区混凝土压碎,试验梁不能继续承受压力,梁体与铺装层也没有发生明显的剪切破坏,符合适筋梁破坏原则。

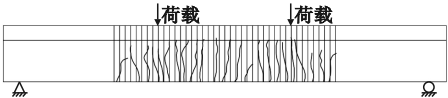


图 8 试验梁 SLP-10-80-4 裂缝示意图
Fig. 8 Crack diagram of test beam SLP-10-80-4

铺装层纵筋类型、直径以及数量对试验梁裂缝发展影响较小,裂缝破坏形态差异不大;而随着铺装层厚度的增加,其承载力也随之提高,最大裂缝宽度减小,裂缝数量减少,裂缝平均间距变大。所以增加铺装层厚度,不但能提高试验梁的承载力,还能对裂缝宽度和数量也有明显的抑制作用。

2.3 试验结果

试验结果见表 2。

表 2 试验结果

Table 2 Test results			kN
试件编号	开裂荷载	屈服荷载	极限荷载
SLP-6-80-4	38	134	166
SLP-8-80-4	45	145	177
SLP-10-80-4	45	163	189
BLP-10-80-4	43	165	194
BLP-6-80-4	43	146	167
BLP-8-100-4	51	174	195
BLP-8-60-4	34	152	175
BLP-8-80-4	42	154	180
BLP-8-80-5	40	159	179
BLP-8-80-3	35	150	168

由试验结果可以看出,采用玄武岩筋混凝土桥面铺装简支梁的屈服荷载高于普通钢筋混凝土桥面铺装简支梁,开裂荷载和抗弯承载力相差较小。

只改变铺装层纵筋类型,铺装层纵筋为玄武岩筋的矩形梁屈服荷载提高了1.23%~8.96%,抗弯承载力提高了0.6%~2.65%;同为普通钢筋,随着直径的增大,屈服荷载和抗弯承载力分别提高了8.21%~21.64%、6.63%~13.86%,同为BFRP筋,随着直径的增大,屈服荷载和抗弯承载力分别提高了5.48%~13.01%、7.78%~16.17%。

铺装层相同筋材类型,不同钢筋直径,相比于试验梁 SLP-6-80-4,试验梁 SLP-8-80-4、SLP-10-80-4 开裂荷载均提高18.42%,屈服荷载提高8.21%、21.64%,承载力提高了6.63%、13.86%,相比于试验梁 BLP-6-80-4,试验梁 BLP-8-80-4、BLP-10-80-4 开裂荷载相差不大,屈服荷载提高5.48%、13.01%,承载力提高了7.78%、16.17%;增加铺装层纵筋数量其开裂荷载、屈服荷载、极限荷载值相差不大;钢筋屈服后同位移水平下试验梁 BLP-8-80-4、BLP-8-80-5 的极限荷载比试验梁 BLP-8-80-3 高9.23%左右;只增加铺装层厚度,开裂荷载提高了23.53%~50%,屈服荷载提高了1.32%~14.47%,极限荷载提高了2.86%~11.43%。

2.4 荷载-位移曲线对比分析

试件荷载-位移曲线见图9。对比分析可知,增大铺装层厚度,试验梁的开裂荷载、屈服荷载和抗弯极限承载力均有较大程度提高。只改变铺装层配筋类型,试验梁开裂后,加铺BFRP筋混凝土梁抗弯承载力相比于铺装层纵筋为普通钢筋的承载力略有提高,在受拉钢筋屈服后,铺装层纵筋为玄武岩筋的混凝土梁承载力高于同直径的普通钢筋混凝土梁,而且同直径不同类型的玄武岩筋混凝土梁对其挠度的制约也有优势,尤其在受拉

钢筋屈服后,对梁挠度的制约能力逐渐提高。可见,在铺装层中引入BFRP筋可一定程度上提高结构的屈服荷载和抗弯承载力。

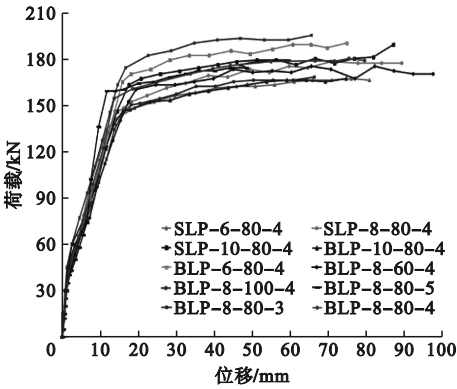


图9 荷载位移曲线

Fig.9 Load displacement diagram

2.5 应变曲线对比分析

2.5.1 梁底纵筋应变曲线对比分析

梁底纵筋荷载应变曲线如图10所示。从图中可以看出,所有试验梁荷载-应变曲线大致分为三个阶段,以混凝土开裂和钢筋屈服为转折点,梁在开裂前混凝土处于弹性阶段,荷载主要由混凝土承担,纵筋的应变较小,应变与荷载关系曲线呈线性,且曲线斜率较大;当裂缝形成且基本稳定后,底部受拉纵筋应变值增加速率加快,直到试验梁破坏,破坏时的应变值超过了屈服应变,满足适筋梁的破坏特征。

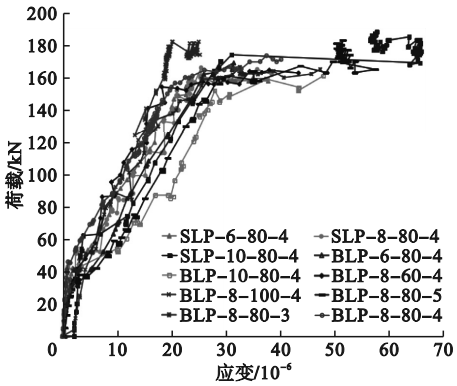


图10 梁底纵筋荷载应变曲线

Fig.10 Load strain curves of the longitudinal bar at the bottom of the test beam

受拉区纵筋应变值大小取决于结构尺寸及底部受拉钢筋的等级及数量,因此在同等条件下,底部受拉区钢筋应变贡献较小;随着铺装层厚度的增加,结构截面尺寸也增大,底部受拉钢筋应变变化较为明显,所以在同条件下,梁底纵筋应变值相差不大,铺装层纵筋替换为玄武岩筋对底部受拉钢筋的应变并无较大影响。

2.5.2 铺装层纵筋应变曲线对比分析

铺装层纵筋荷载应变曲线如图 11 所示。从图中可以看出,梁在到达屈服荷载时,铺装层纵向受压钢筋均在弹性阶段,在相同荷载下,玄武岩筋的应变在加载过程中比普通钢筋的应变值略小,增大铺装层厚度,能够提高试验梁的承载力,铺装层纵筋没有充分发挥作用,对矩形梁的抗弯承载力几乎没有影响。所以在同一配置条件下,BFRP 比普通钢筋的效果更好,将铺装层纵向钢筋替换为玄武岩筋,可以发挥其自身的优势,对推动玄武岩筋的应用和推广有重要意义。

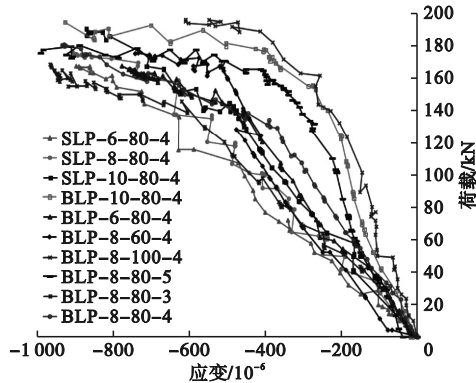


图 11 铺装层纵筋荷载应变曲线

Fig. 11 Strain curves diagram of the longitudinal reinforcement load of the pavement layer

3 结 论

(1) 试验梁受力特征均为受拉区纵向钢筋先发生屈服,在纯弯段出现较多竖向裂缝,然后逐渐延伸至铺装层,裂缝发展趋势基本相近,而后以受压区混凝土的压溃而破坏,属于典型的适筋梁弯曲破坏状态。

(2) 对于相同铺装层纵筋直径,不同筋材类型,采用 BFRP 筋混凝土桥面铺装梁的屈服荷载高于普通钢筋混凝土桥面铺装梁,提高了 1.23% ~ 8.96%,开裂荷载和抗弯承载力基本相近。对于相同筋材类型,筋材直径由 6 mm 增加到 10 mm,普通钢筋混凝土梁屈服荷载提高了 8.21% ~ 21.64%,极限承载力提高了 6.63% ~ 13.68%;BFRP 筋混凝土梁屈服荷载提高了 5.48% ~ 13.01%,极限承载力提高了 7.78% ~ 16.17%。所以在相同配置条件下,将铺装层中普通钢筋替换为 BFRP 筋,玄武岩筋混凝土梁的受弯性能不但优于普通钢筋混凝土梁,还能弥补铺装层中钢筋易腐蚀的缺陷。

参考文献

[1] 张于漪. 水泥混凝土桥面铺装薄层加铺技术探讨[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2019(9):159-161.
(ZHANG Yuyi. Discussion on thin layer overlay technology of cement concrete bridge deck pavement [J]. Highway transportation technology(applied technology edition), 2019(9):159-161.)

[2] KIM T W, BAEK J, LEE H J, et al. Effect of pavement design parameters on the behaviour of orthotropic steel bridge deck pavements under traffic loading [J]. International journal of pavement engineering, 2014, 15(5):471-482.

[3] 朱华. 公路桥梁常见病害原因分析及防治[J]. 科技视界, 2016(20):205-206.
(ZHU Hua. Analysis and prevention of common diseases of highway bridges [J]. Scientific and technological horizon, 2016(20):205-206.)

[4] 马融, 陈飞. ERS 钢桥面铺装病害调研及原因分析[J]. 中外公路, 2019, 39(3):175-178.
(MA Rong, CHEN Fei. ERS steel bridge deck pavement disease investigation and cause analysis [J]. Journal of China & foreign highway, 2019, 39(3):175-178.)

[5] 程伟蔚. 沥青混凝土桥面铺装斜剪试验的研究[D]. 大连:大连理工大学, 2010.
(CHENG Weiwei. The skew shearing test study on asphalt bridge deck overlays [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2010.)

[6] GRACE N F, SOLIMAN A K, ABDEL S G, et al. Behavior and ductility of simple and continuous FRP reinforced beams [J]. Journal of composites for construction, 1998, 2(4):186-194.

[7] BISCHOFF P H, PAIXAO R. Tension stiffening and

- cracking of concrete reinforced with glass fiber [J]. Canadian journal of civil engineering, 2004, 31(4): 579 - 588.
- [8] 李国东, 张楠. 混杂纤维混凝土抗盐冻性能试验研究[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2023, 42(2): 165 - 171.
(LI Guodong, ZHANG Nan. Experimental investigation on salt-freezing resistance of hybrid fiber-reinforced concrete [J]. Journal of Liaoning technical university (natural science), 2023, 42(2): 165 - 171.)
- [9] YOST J R, GOODSPEED C H, SCHMECKPEPER E R. Flexural performance of concrete beams reinforced with FRP grids [J]. Journal of composites for construction, 2001, 5(1): 18 - 25.
- [10] 王全凤, 杨勇新, 岳清瑞. FRP 复合材料及其在土木工程中的应用研究[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2005, 26(1): 1 - 3.
(WANG Quanfeng, YANG Yongxin, YUE Qingrui. Research on FRP composite and its application in civil engineering [J]. Journal of huaqiao university (natural science edition), 2005, 26(1): 1 - 3.)
- [11] LI Weimin, XU Jinyu. Impact characterization of basalt fiber reinforced geopolymeric concrete using $\phi 100$ -mm-diameter split Hopkinson pressure bar [J]. Materials science and engineering (a), 2009(513/514): 145 - 153.
- [12] 赵民, 董雨, 丁向群, 等. 等离子热喷涂玄武岩涂层物相结构研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2010, 26(2): 375 - 379.
(ZHAO Min, DONG Yu, DING Xiangqun, et al. Research on structure of nature basalt coating with at mospheric plasma spraying [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2010, 26(2) 375 - 379.)
- [13] 钱振东, 刘长波, 唐宗鑫, 等. 短切玄武岩纤维对环氧沥青及其混合料性能的影响[J]. 公路交通科技, 2015, 32(6): 1 - 5.
(QIAN Zhendong, LIU Changbo, TANG Zongxin, et al. Effect of basalt fiber chopped strand on performance of epoxy asphalt and its mixture [J]. Journal of highway and transportation research and development, 2015, 32(6): 1 - 5.)
- [14] 沈新. 玄武岩纤维筋性能试验及其路用性能研究[D]. 南京: 东南大学, 2011.
(SHEN Xin. Experiment on properties of basalt fiber reinforced polymer and research of road application [D]. Nanjing: Southeast University, 2011.)
- [15] KIM M T, KIM M H, RHEE K Y, et al. Study on an oxygen plasma treatment of a basalt fiber and its effect on the interlaminar fracture property of basalt/epoxy woven composites [J]. Composites part b (engineering), 2011, 42(3): 499 - 504.
- [16] TAN K H. Behaviour of hybrid FRP-steel reinforced concrete beams [J]. Journal of composites for construction, 1997, 42(6): 25 - 34.
- [17] 卢启煌, 孟江, 赵宝俊. 空心板桥刚性桥面铺装技术研究[J]. 福建建设科技, 2012(2): 74 - 75.
(LU Qihuang, MENG Jiang, ZHAO Baojun. Research on rigid deck pavement technology of hollow slab bridge [J]. Fujian construction technology, 2012(2): 74 - 75.)
- [18] FANG H, ZOU F, LIE W Q. Mechanical performance of concrete pavement reinforced by CFRP grids for bridge deck applications [J]. Composites part b (engineering), 2017, 110(1): 315 - 335.
- [19] 周俊龙, 江世永, 欧忠文. 玄武岩纤维增强塑料筋耐海水腐蚀性研究[J]. 后勤工程学院学报, 2011, 27(2): 57 - 62.
(ZHOU Junlon, JIANG Shiyong, OU Zhongwen. Study on seawater corrosion resistance of basalt fiber reinforced plastic reinforcement [J]. Journal of logistics engineering college, 2011, 27(2): 57 - 62.)
- [20] 张新越, 欧进萍. FRP 筋酸碱盐介质腐蚀与冻融耐久性试验研究[J]. 武汉理工大学学报, 2007, 29(1): 34 - 36.
(ZHANG Xinyue, OU Jinping. Experimental study on corrosion and freeze-thaw durability of FRP tendons in acid, alkali and salt media [J]. Journal of Wuhan university of technology, 2007, 29(1): 34 - 36.)
- [21] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 混凝土结构试验方法标准: GB/T50152—2012 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
(Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Standard for test methods for concrete structures: GB/T50152—2012 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.)
- [22] 姚振刚, 刘祖华. 建筑结构试验[M]. 上海: 同济大学出版社, 1996.
(YAO Zhengang, LIU Zuhua. Examine of architectural structure [M]. Shanghai: Tongji University Press, 1996.)
- [23] 秦丽辉. 玄武岩纤维布加固损伤混凝土梁力学性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
(QIN Lihui. Study on mechanical properties of damaged concrete beams reinforced with basalt fiber cloth [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.)

(责任编辑: 杨永生 英文审校: 刘永军)