配比对纤维沥青碎石表层性能的影响

张争奇, 郭寒萍, 王志祥
(长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室, 西安 710064)

摘 要: 为了分析配合比参数对纤维沥青碎石表层性能的影响,根据纤维沥青碎石的材料组成和力学特性,采用直接拉拔和正压扭剪实验对试件进行强度测试,并应用正交分析法对实验结果进行分析,得出了各配比对纤维沥青碎石表层性能的影响规律. 研究结果表明:乳化沥青用量和碎石用量对纤维沥青碎石表层强度的影响水平比纤维用量和纤维长度显著;层间抗拉强度随着乳化沥青用量和碎石用量的增多而逐渐增大,抗剪强度随着乳化沥青用量的增多而增大,随着碎石用量的增多先增大后减小;当乳化沥青用量为 2.0 kg/m^2、碎石用量为 13 kg/m^2、纤维用量为 0.1 kg/m^{2}和纤维长度为 60 mm 时,纤维沥青碎石表层的性能最优.

关键词: 纤维沥青表层; 沥青路面; 抗拉强度; 抗剪强度; 正交试验
中图分类号: U 416 **文献标志码**: A **文章编号**: 0254 - 0037(2015)08 - 1186 - 07
doi: 10.11936/bjutxb2014120010

Effect of Proportion on the Surface Performance of Fiber Asphalt Macadam

ZHANG Zheng-qi, GUO Han-ping, WANG Zhi-xiang
(Key Laboratory of Highway Engineering in Special Region of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: In order to analyze the effect of ration parameter on surface properties of fiber asphalt macadam. The direct drawing and torsional sheer test were used to test strength on molding specimens which was on the basis of material composition and mechanical properties of fiber asphalt macadam. The orthogonal analysis method was used to analyze experimental results and the effect law of ration was drawn. The research shows that the influence of amount of emulsified asphalt and gravel content on fiber asphalt macadam surface strength is more significant than that of fire content and length. The tensile strength of the interlayer increases gradually with the increasing amount of emulsified asphalt and gravel. The shear strength increases with the increasing amount of emulsified while increases first and then decreases with the growth of gravel content. At last, when the amount of emulsified asphalt is 2.0 kg/m^2, stone dosage is 13 kg/m^2, fiber is 0.1 kg/m^2 and fiber length is 60 mm, the surface performance is optimal.

Key words: fiber asphalt surface; asphalt pavement; tensile strength; shearing strength; orthogonal test

纤维封层技术是指采用纤维封层核心设备同时洒布沥青和玻璃纤维,再洒布碎石,经碾压后形成新的磨耗层或应力吸收中间层的一种新型道路建设施工和养护技术[1]. 纤维封层施工时,将特定工艺切割的纤维均匀乱向地洒布在上、下两层沥青中,纤维相互搭接并与沥青混合料形成网络缠绕结构,有效

收稿日期: 2014-12-03
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51008031)
作者简介: 张争奇(1967—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事改性沥青、高性能沥青混合料技术方面的研究, Email: z_zhengqi@126.com

地提高了纤维封层的抗拉、抗剪、抗压和抗冲击等综合力学性能，类似在新建道路基层和面层之间或原有路面基础上加铺了一层具有高弹性和高强度的防护网垫[2]. 该技术特别适用于旧沥青路面(或新建路基)、面层层间应力吸收中间层和原有旧沥青路面耐磨层施工，对新旧沥青道路的建设及养护起到有效保护作用，并能延长其养护周期及服务寿命.

目前，纤维沥青碎石表层技术在国内的应用主要是借鉴国外同步碎石施工的经验，没有相应的配合比设计方法、现场性能检测和评价方法，极大地限制了该技术在国内的广泛应用. 本文根据纤维沥青碎石结构层功能要求和抗反射裂缝机理，采用抗拉和抗剪强度评价纤维沥青碎石的力学性能，并用正交法分析了各配比对纤维沥青碎石表层性能的影响.

1　试验方法

1.1　试验材料

纤维碎石表层所用的原材料主要有集料、纤维和沥青结合料. 原材料的质量对纤维沥青碎石表层的性能有很大的影响，因此，原材料的选择对保证纤维沥青碎石表层的优良性能至关重要.

根据纤维沥青碎石表层的施工工艺可知，纤维沥青碎石表层试件分为两部分：沥青混凝土垫块和纤维碎石封层[3-4]. 垫块组成材料为 4.5% 的普通道路石油沥青和 AC－13 型的石灰岩集料. 纤维碎石表层的组成材料为阳离子、快凝喷洒型 SBR 聚合物乳化改性沥青，集料为 5 ~ 10 mm 的玄武岩，纤维采用 2400tex 喷射无捻粗纱型玻璃纤维[5-7](见图 1).

图 1　玻璃纤维

Fig. 1　Glass fiber

1.2　试件尺寸及成型

根据纤维沥青碎石表层的施工设备及工艺可知，纤维沥青碎石表层试件的成型过程大致可分为 3 步，即浇筑、碾压和养生. 这一过程中的关键点是如何选取合适的方法模拟现场层铺法铺筑纤维沥青碎石表层来成型试件，最终确定出实验室成型试件的浇筑方式、碾压遍数及养生环境.

沥青混凝土垫块按《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTJ052—2000)的试验方法制作，试件尺寸为 300 mm × 300 mm × 40 mm.

纤维碎石表层试件的平面尺寸为 300 mm × 300 mm，厚度为 5 ~ 10 mm. 模拟纤维沥青碎石表层的现场碾压方式，根据《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTJ052—2000)的要求，采用轮碾法对试件进行压实，并将橡胶垫置于试件表面对纤维碎石表层试件进行碾压. 纤维碎石表层的具体浇筑步骤为：刷第 1 层沥青—洒布纤维—刷第 2 层沥青—洒布碎石，整个过程控制在 5 ~ 6 min 内完成，洒布碎石后立即将 15 mm 厚的橡胶垫放在试件表面上并置于轮碾成型仪中进行压实，初压 5 次后放入恒温(60 ℃)烘箱中养护 4 h，再复压 60 次后将试件取出冷却至室温，成型试件如图 2 所示.

图 2　纤维沥青碎石混合料成型试件

Fig. 2　Specimens of fiber asphalt macadam

1.3　拉拔试验与正压扭剪试验方法

为了使室内试验研究的过程及结果更加接近工程实践，故在选择试验方法时，应遵循以下原则：

1) 考虑纤维沥青碎石表层的黏结强度形成过程.

2) 室内试验应能充分模拟路面在车辆荷载作用下的实际受力状态.

3) 试验过程简单且适用广泛.

据此，本文选用拉拔试验和正压扭剪试验进行研究.

拉拔试验参照《梁桥面铺装设计与施工技术指南》中黏结强度的试验方法，具体试验方法如图 3 所示[7]. 拉头为钢板制作，直径 100 mm，厚度 15 mm；拉力计为数显式拉力计，量程 5 000 N，精度 10 N；黏结剂是环氧树脂和固化剂混合而成. 试验时，将纤维碎石表层试件表面打磨平整，黏结剂均匀涂抹在碎石表层，再将加热后的拉头粘贴到黏结剂，待黏结剂强度达到要求后以 100 mm/min 的速率进行拉拔. 用纤维沥青碎石表层破坏时拉拔力的大小表

征层间抗拉强度,拉力值以拉力计稳定后的读数为准.

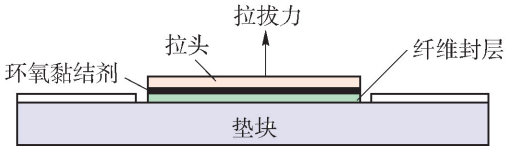


图 3 拉拔试验示意图

Fig. 3 Test way of drawing strength

正压扭剪试验是对纤维碎石表层抗剪强度的检测,采用量程和精度分别为 100 kN·m 和10 N·m 的扭矩扳手测量,试验条件与拉拔试验基本相同,试验方法如图 4 所示. 试验时缓慢转动扳手,向试件逐渐施加扭矩,当层间发生脱离时记录扭矩扳手的读数,以此来表征纤维碎石层间抗剪强度.

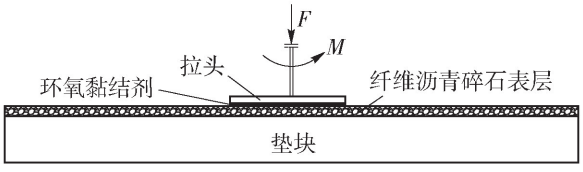


图 4 正压扭剪试验示意图

Fig. 4 Test way of torsional sheer

2 纤维沥青碎石表层力学性能评价及影响因素研究

工程实践表明,普通碎石表层在车辆荷载的反复作用下容易发生推移、拥抱等路面病害,主要是由于碎石封层与原路面之间的黏结力不足. 因此,纤维沥青碎石表层的层间黏结性能对于防止路面病害和提高路面的预防性养护效果至关重要. 纤维沥青碎石表层施工工艺如图 5 示,玻璃纤维在两层沥青结合料之间,形成相互缠绕的网络结构,有效地提高了纤维沥青碎石表层抗拉和抗剪等力学性能,效果见图 6,玻璃纤维和沥青混凝土之间的相对变形(滑移)形成了层间黏结力[8-9].

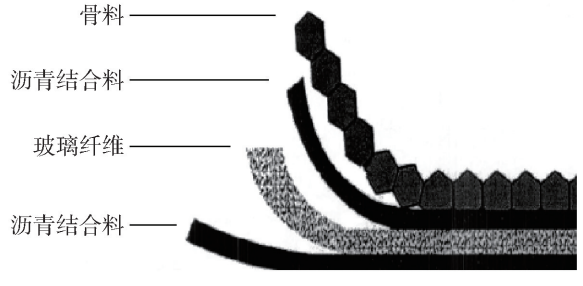


图 5 纤维沥青碎石表层施工工艺图

Fig. 5 Construction artwork of fiber asphalt macadam

图 6 纤维沥青碎石表层效果图

Fig. 6 Renderings of fiber asphalt macadam

2.1 配比参数对层间抗拉强度的影响分析

为了定量分析各配比对纤维沥青碎石表层层间抗拉强度的影响,将成型的试件进行拉拔试验,用层间破坏时拉拔力的大小表征层间黏结强度.

对影响纤维沥青碎石表层性能的因素进行分析,选择乳化沥青用量、碎石用量、纤维用量[10]和纤维长度 4 个因素进行研究,每个因素分 3 个水平,按照 $L_9(3^4)$ 正交表(见表 1)设计试验. 每组实验进行 3 次,记录拉拔力的大小并求其平均值,试验结果如表 2 所示. 采用统计学软件 SPSS 对试验数据进行分析,如图 7、8 所示. 需要说明的是,第 2 节所选用的材料用量均为试件表面 300 mm × 300 mm 面积上的用量,即每个试验试件所用材料的量.

表 1 $L_9(3^4)$ 正交试验表

Table 1 $L_9(3^4)$ Orthogonal table

序号	沥青用量/g	碎石用量/g	纤维用量/g	纤维长度/mm
1	105	900	7	40
2	105	1 050	9	60
3	105	1 200	11	80
4	135	900	9	80
5	135	1 050	11	40
6	135	1 200	7	60
7	165	900	11	60
8	165	1 050	7	80
9	165	1 200	9	40

注:表中各材料用量为 300 mm × 300 mm 面积上的用量.

表 2 拉拔试验结果

Table 2 Results of direct drawing kN

序号	1	2	3	4	5
平均拉力	0. 39	0. 62	0. 64	0. 68	0. 60
序号	6	7	8	9	
平均拉力	0. 68	0. 75	0. 81	0. 82	

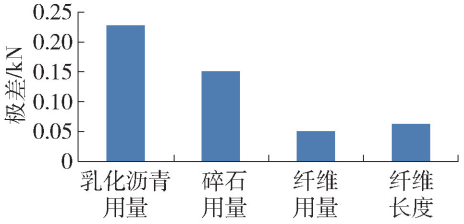


图 7　各因素对层间抗拉强度的影响程度

Fig. 7　Influence of various factors on the tensile strength between layers

由图 7 可知：在 4 个因素中，按对纤维沥青碎石表层层间抗拉强度的影响程度进行排序，从大到小依次为乳化沥青用量 > 碎石沥青 > 纤维长度 > 纤维用量，且乳化沥青用量和碎石用量的影响水平显著高于纤维用量和纤维长度.

分析图 8 可以发现：

1）由图 8(a)可知，层间抗拉力随着乳化沥青用量的增加而增大，表明层间抗拉强度随着乳化沥青用量的增加而增大. 这是因为加入的玻璃纤维需要沥青的裹覆，使得沥青最佳用量增加，而且玻璃纤维对沥青具有稳定、吸附的作用，从而增加了沥青与集料和沥青与纤维的黏结强度.

2）由图 8(b)可知，层间抗拉力随着碎石用量的增加不断增大，但在 1 050 ~ 1 200 g 时的增长幅度有所下降，这说明在 900 ~ 1 050 g 范围内，碎石用量的增加增大了沥青对碎石的裹覆面积，结构沥青的含量增多，层间抗拉强度逐渐增大；而过多的碎石用量会导致结构沥青含量的相对减少，拉拔力的增加幅度减弱.

3）由图 8(c)(d)可知，随着纤维用量和纤维长度的增加，抗拉力出现先增大后减小的趋势，当纤维用量和纤维长度分别为 9 g 和 60 mm 时，抗拉力达到最大值. 这是因为只有玻璃纤维的长度大于荷载传递长度时，才能起到好的增强效果，且纤维的利用率越高，增强效果就越明显；但过长的纤维会使形成的纤维沥青网络结构稀疏，反而降低了纤维网络对沥青混凝土的约束力.

2.2　配比参数对层间抗剪强度的影响分析

基于纤维沥青碎石表层的受力特性，本文采用正压扭剪试验对碎石表层抗剪强度进行检测，用层间破坏时扭矩的大小表征层间抗剪强度.

试件的成型方法和选取的影响因素与抗拉强度试验一样，同样按照 $L_9(3^4)$ 正交表设计试验进行扭剪试验，记录测试的扭矩值并求平均，结果如表 3 所示，试验结果见图 9、10.

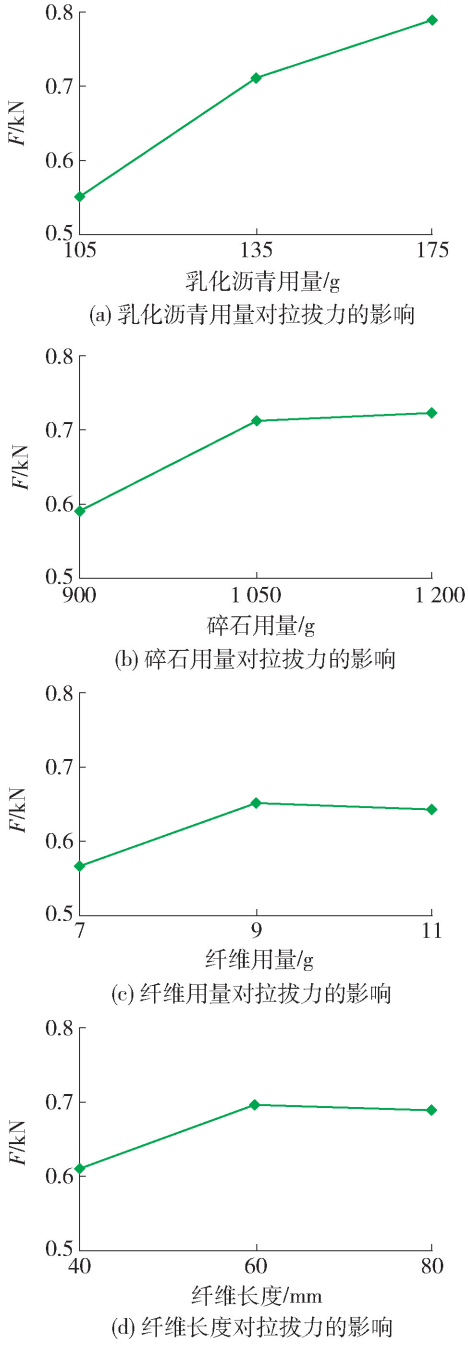


图 8　正交试验抗拉强度指标分析

Fig. 8　Analysis of tensile strength index of orthogonal test

表 3　正压扭剪试验结果

Table 3　Results of torsional sheer test　kN·m

序号	1	2	3	4	5
平均扭矩	21.68	27.71	35.58	30.98	33.15
序号	6	7	8	9	
平均扭矩	38.99	40.11	39.98	42.85	

根据图 9 可知，各因素对纤维沥青碎石表层层

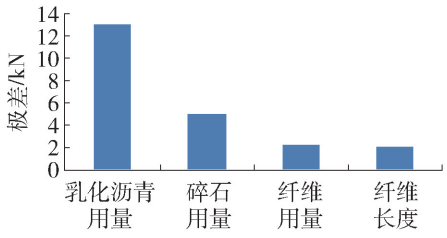


图 9 各因素对层间抗剪强度的影响程度

Fig. 9 Influence of various factors on the shear strength between layers

间抗剪强度影响程度由大到小顺序为:乳化改性沥青 > 碎石用量 > 纤维用量 > 纤维长度,且碎石用量、纤维用量和纤维长度的影响水平明显低于乳化沥青用量.

分析图 10 可以发现:

1)扭矩值随乳化沥青用量的增加而增大,表明层间抗剪强度随着乳化沥青用量的增加而增大. 这是由于乳化沥青用量的增加增大了纤维和碎石的裹覆面积,纤维对沥青的稳定和"加筋"作用提高了层间抗剪强度.

2)与层间抗拉强度不同,层间抗剪扭矩随着碎石用量的增加先增大后减小,当碎石用量为 1 050 g 时达到最大值. 碎石用量从 900 g 逐渐增加到 1 050 g,碎石被沥青裹覆面积逐渐增大,结构沥青含量增加,抗剪强度增大;而当碎石用量大于 1 050 g 后,碎石用量的增加会形成一些"自由"碎石,这些碎石在扭剪过程中由于缺乏黏结力而出现滑动现象,降低层间抗剪强度.

3)层间抗剪扭矩随着纤维用量和纤维长度的增加先增大后减小,当纤维用量为 9 g 和纤维长度为 60 mm 时,扭矩值达到最大. 玻璃纤维的加入相当于填料填充在沥青混凝土中,对混凝土起到稳定吸附的作用,有利于沥青混合料中沥青膜厚度的增加,也增大了沥青与集料及沥青与纤维的黏结性能,但是过多的纤维会在沥青混合料中形成纤维薄弱层,不利于层间抗剪强度的形成.

3 纤维沥青碎石表层配合比研究

目前,国内外关于碎石表层的配合比设计方法都是基于实践的经验法,本文结合 2.1、2.2 节层间抗拉和抗剪强度指标,通过室内试验确定各材料用量. 由 2.2、2.3 节的分析结果可知,相对于沥青和碎石的用量,纤维的用量和长度对层间抗拉和抗剪强度的影响水平很小,所以在配合比设计时可以根

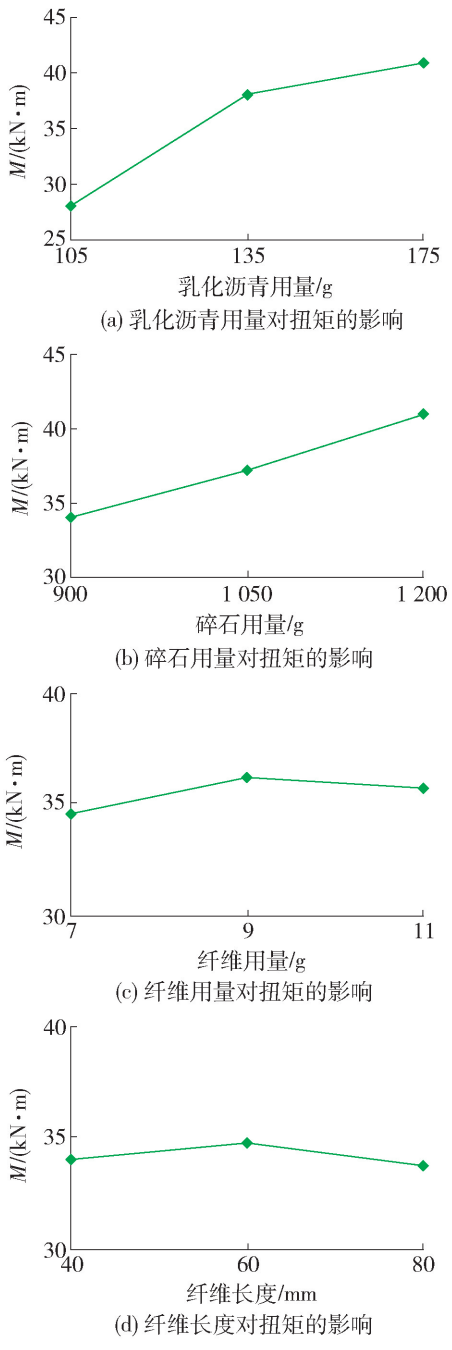
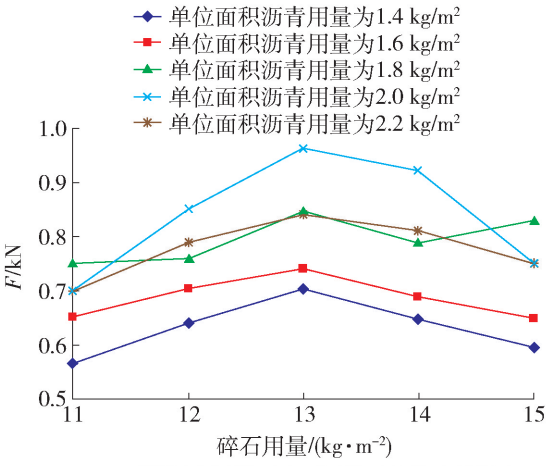


图 10 正交试验抗剪强度指标分析

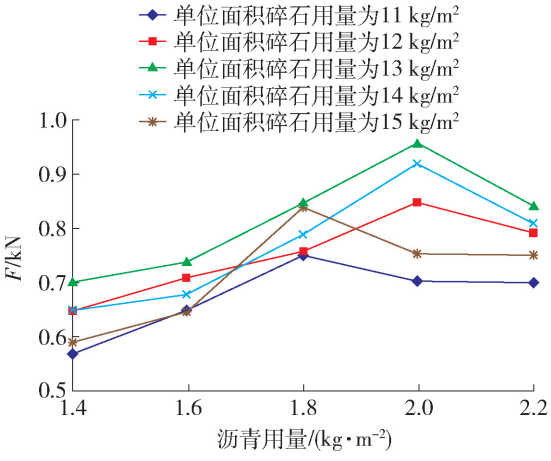
Fig. 10 Analysis of shear strength index of orthogonal test

据国内外工程经验选取纤维长度为 60 mm、纤维用量为 9 g,即单位面积用量为 0.1 kg/m^2.

分析乳化沥青用量和碎石用量对纤维沥青碎石表层强度的影响,选用不同的单位面积乳化沥青和碎石用量进行拉拔试验和正压扭剪试验,单位面积乳化沥青用量为 1.4、1.6、1.8、2.0、2.2 kg/m^2,单位面积碎石用量为 11、12、13、14、15 kg/m^2. 记录试验结果并分析,沥青用量和碎石用量对层间抗拉强度和抗剪强度的影响分别如图 11、12 所示.



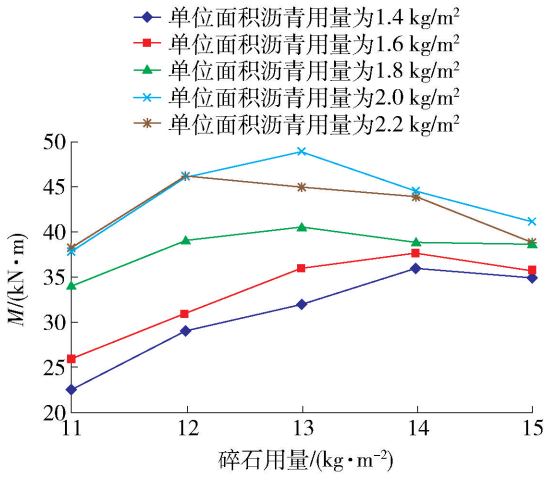
(a) 不同沥青用量下碎石用量对拉拔力的影响



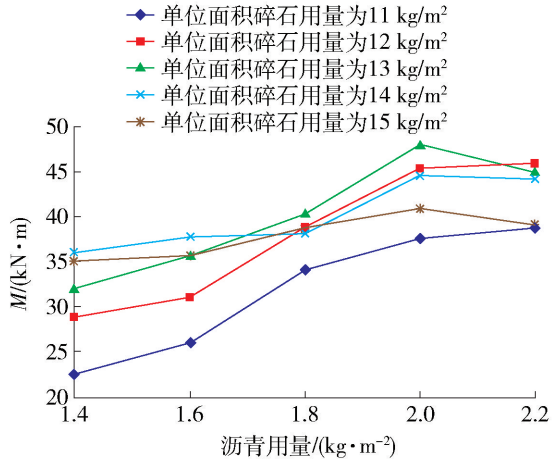
(b) 不同碎石用量下沥青用量对拉拔力的影响

图 11　沥青和碎石用量对抗拉强度指标的影响

Fig. 11　Effect of amount of asphalt and gravel on the tensile strength index



(a) 不同沥青用量下碎石用量对扭矩的影响



(b) 不同碎石用量下沥青用量对扭矩的影响

图 12　沥青和碎石用量对抗剪强度指标的影响

Fig. 12　Effect of amount of asphalt and gravel on the shear strength index

分析图 11 和图 12 可得：

1）纤维沥青碎石表层的抗拉、抗剪强度与沥青和碎石的用量不是简单的线性关系，随着沥青和碎石用量的增加，均呈先增大后减小的趋势.

2）图 11(a)表明在同一沥青用量下，层间抗拉力随着碎石用量的增多先增大后减小，沥青用量为 2.0 kg/m^{2}时的拉拔力均大于其他沥青含量时的拉拔力，且当碎石用量为 13 kg/m^{2}时，拉拔力最大. 图 11(b)表明在同一碎石用量下，层间抗拉强度随着沥青用量的增多先增大后减小，碎石用量为 13 kg/m^{2}时的拉拔力均大于其他碎石含量时的拉拔力，且沥青用量为 2.0 kg/m^{2}时达到最大.

3）图 12(a)表明在同一沥青用量下，层间抗剪强度随着碎石用量的增多先增大后减小，图 12(b)表明在同一碎石用量下，层间抗剪强度随着沥青用量的增多逐渐增大后减小，这与层间抗拉强度的变化趋势一致，在沥青用量为 2.0 kg/m^2、碎石用量为 13 kg/m^{2}时，抗剪强度达到最大值.

综上所述，结合抗拉强度和抗剪强度这 2 个指标，当纤维沥青碎石表层的配比参数为：乳化沥青用量 2.0 kg/m^2、碎石用量 13 kg/m^2、纤维用量 0.1 kg/m^2、纤维长度 60 mm 时，纤维沥青碎石表层的性能最优.

4　结论

本文采用直接拉拔试验和正压扭剪试验对纤维沥青碎石表层试件进行测试，根据试验结果得出以下结论：

1）纤维沥青碎石表层中的玻璃纤维可以增强层间黏结力，通过直接拉拔试验和正压扭剪试验得

出了层间抗拉和抗剪强度指标分别为层间破坏时的拉拔力和扭矩值.

2）应用正交试验对纤维沥青碎石表层力学性能的影响因素进行分析可知,层间抗拉强度影响因素由大到小的顺序为:乳化沥青用量 > 碎石用量 > 纤维长度 > 纤维用量;层间抗剪强度影响因素由大到小的顺序为:乳化沥青用量 > 碎石用量 > 纤维用量 > 纤维长度.

3）分析各配比的影响规律,当乳化沥青用量为 2.0 kg/m^2、碎石用量为 13 kg/m^2、纤维用量为 0.1 kg/m^2、纤维长度为 60 mm 时,纤维沥青碎石表层的性能最优.

参考文献:

[1] 孙小明. 纤维封层技术在道路预养护工程中的应用[J]. 中国市政工程, 2010(3): 12-14.
SUN Xiao-ming. Application of fiber seal technology in preventive road maintenance project[J]. China Municipal Engineering, 2010(3): 12-14. (in Chinese)

[2] 刘军收, 范晓燕. 沥青纤维碎石封层在路面预防性养护中的应用[J]. 公路, 2010(7): 194-197.
LIU Jun-shou, FAN Xiao-yan. Application of asphalt chip seal layer fiber in the pavement preventive maintenance [J]. Highway, 2010(7): 194-197. (in Chinese)

[3] 耿涛, 刘文. 纤维碎石封层试件成型方法研究[J]. 中国经贸, 2008(9): 47-51.
GENG Tao, LIU Wen. Research on specimen molding method of fiber chip seal[J]. China Trade, 2008(9): 47-51. (in Chinese)

[4] 叶尖. 纤维碎石封层试件成型方法研究[D]. 大连: 大连理工大学建设工程学院, 2009.
YE Jian. Research on the method for molding of fiber-reinforced chip seal[D]. Dalian: School of Construction Engineering, Dalian University of Technology, 2009. (in Chinese)

[5] 王淑娟. 玻璃纤维格栅用于防止沥青路面产生反射裂缝的研究[D]. 南京: 南京林业大学土木工程学院, 2008.
WANG Shu-juan. Research on glass fiber grid to prevent reflection cracking of asphalt pavement [D]. Nanjing: School of Civil Engineering, Nanjing Forestry University, 2008. (in Chinese)

[6] 黄珊. 玻璃纤维增强沥青混凝土效果分析与试验研究[D]. 长春: 吉林大学交通学院, 2009.
HUANG Shan. The effect analysis and experimental study on asphalt concrete [D]. Changchun: School of Transportation, Jilin University, 2009. (in Chinese)

[7] 李坤. 纤维封层力学性能试验研究[D]. 大连: 大连理工大学建设工程学院, 2009.
LI Kun. Experiment investigation of performances on mechanics of fiber-reinforced chip seal [D]. Dalian: School of Construction Engineering, Dalian University of Technology, 2009. (in Chinese)

[8] 张宏波. 纤维同步封层在路面工程中的应用[J]. 养护机械与施工技术, 2010(5): 55-57.
ZHANG Hong-bo. Application of fiber synchronous sealing in pavement engineering[J]. Maintenance Machinery & Construction Technology, 2010(5): 55-57. (in Chinese)

[9] 郭振霞. 纤维沥青碎石封层在道路养护中的应用[J]. 养护天地, 2010(13): 98-99.
GUO Zhen-xia. Application of fiber asphalt in road maintenance[J]. Maintenance of Heaven and Earth, 2010 (13): 98-99. (in Chinese)

[10] 张超, 韩伟华, 马琳. 纤维沥青混合料中纤维最佳用量的确定方法[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2009, 29(2): 9-12.
ZHANG Chao, HAN Wei-hua, MA Lin. Optimum volume determination method of fiber in asphalt mixture [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2009, 29(2): 9-12. (in Chinese)

(责任编辑 郑筱梅)