

文章编号:1674-2974(2016)07-0082-06

橡胶环氧沥青碎石防水黏结层抗剪性能研究*

钱振东[†], 薛永超, 孙 健

(东南大学 智能运输系统研究中心, 江苏 南京 210096)

摘要:为了研究钢桥面铺装用橡胶环氧沥青碎石(REAS)防水黏结层的抗剪性能,并分析其与桥面坡度及环境温度频繁变化的关系,进行不同剪切角度和不同冻融循环次数的斜剪试验,通过剪切界面正应力与抗剪强度的线性拟合关系计算 REAS 防水黏结层的黏聚力及内摩擦角,并基于能量法理论对其剪切耗散能进行研究.结果表明:添加橡胶粉的环氧沥青黏结料(EA)体系内形成了新的化学交联和物理缠结,表现出更好的黏结性能、抗变形能力和低温柔韧性;不同的剪切角度及冻融循环次数下,REAS 防水黏结层的抗剪强度及剪切位移均大于 EA 防水黏结层,表现出更好的抗剪性能.同时,REAS 防水黏结层的抗剪强度随着剪切角度的增加呈幂函数减小趋势,随冻融循环次数的增加呈抛物线型衰减,5次冻融循环后,REAS 防水黏结层的剪切耗散能相对于未冻融循环的剪切耗散能减小了46.0%,说明冻融循环对 REAS 防水黏结层的抗剪性能影响显著.

关键词:橡胶环氧沥青碎石;防水黏结层;抗剪强度;黏聚力;冻融循环;剪切耗散能

中图分类号:U416.217

文献标识码:A

Shear Performance of Waterproof Cohesive Layer of Rubber Epoxy Asphalt Stone

QIAN Zhen-dong[†], XUE Yong-chao, SUN Jian

(Intelligent Transportation System Research Center, Southeast Univ, Nanjing, Jiangsu 210096, China)

Abstract: This paper studied the shear performance of waterproof cohesive layer of a rubber epoxy asphalt stone (REAS) on steel deck pavement, and examined the relationships between the shear performance and the frequent change of bridge slope and environment temperature. Firstly, the oblique shear tests were conducted under different shear angles and freeze-thaw cycle times. Considering the linear relationship between normal stress and shear strength, the cohesive force and the internal friction angle of REAS waterproof cohesive layer were calculated. According to the energy method, shear dissipated energy was analyzed. The test results showed that new chemical cross linking and physical entanglement occurred in the epoxy asphalt binder with rubber power, which exhibits better bonding performance, anti-deforming capability and cryogenic flexibility. Under different shear angles and freeze-thaw cycle times, the shear strength and shear displacement of REAS waterproof cohesive layer were greater than those of EA waterproof cohesive layer. It is demonstrated that the REAS waterproof cohesive layer has better shear perform-

* 收稿日期:2015-08-27

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51178114), National Natural Science Foundation of China(51178114)

作者简介:钱振东(1969-),女,江苏南通人,东南大学教授,博士生导师

[†] 通讯联系人, E-mail: qianzd@seu.edu.cn

ance. On the other hand, the shear strength of the REAS waterproof cohesive layer decreased as a power function with the increase of the shear angle, while it decreased as a parabolic curve with the increase of freeze-thaw cycle times. After five freeze-thaws cycle times, the shear dissipated energy of REAS waterproof cohesive layer decreased by 46.0%, which indicates that the freeze-thaw cycles significantly influenced the shear performance of REAS waterproof cohesive layer.

Key words: rubber epoxy asphalt stone (REAS); waterproof cohesive layer; shear strength; cohesive force; freeze-thaw cycles; shear dissipated energy

防水黏结层具有防水、黏结和应力吸收的作用,在钢桥面铺装体系中至关重要,其好坏直接影响到桥面铺装的使用周期以及桥梁结构的安全,因此各国均十分重视防水黏结层的设置。^[1-3]橡胶沥青碎石封层作为一种常用的防水黏结层,被广泛应用于桥面防水铺装等工程中,表现出良好的应力过渡和防水黏结性能。^[4]但是由于钢桥面所处环境的严峻性,较大的桥面坡度设置以及环境温度的频繁变化,目前工程实践中不断出现由于防水黏结层剪切破坏而产生的钢桥面铺装层脱离、推移等病害。

橡胶环氧沥青碎石(REAS)防水黏结层是一种由环氧沥青黏结料(EA)、橡胶粉及碎石构成的钢桥面用防水黏结层。其中,EA是一种热固性材料,具有优异的黏结性、热稳定性、密水性及耐腐蚀性,但是,当温度降到极低时,其固化内应力会急剧增大,直接导致其脆性变大、延展性变低、抗剪切性能下降;^[5]橡胶粉是一种优良的沥青改性剂,能显著改善沥青的黏弹性、温度敏感性、弹性恢复性能以及抗剪性能。^[6-7]目前对这种由热固性沥青构成的防水黏结层的研究较少^[8],尤其是其抗剪性能与桥面坡度及环境温度频繁变化的关系。

本文通过斜剪试验对比研究 REAS 防水黏结层与 EA 防水黏结层的抗剪性能,并分析 REAS 防水黏结层的抗剪性能与剪切角度及冻融循环次数的关系,为 REAS 防水黏结层在实际工程中的应用及养护提供参考。

1 原材料及试验试件制作

1.1 原材料

试验研究采用的 EA 为钢桥面用国产环氧沥青黏结料,橡胶粉采用天津产大货车子午胎橡胶粉,所用玄武岩碎石的粒径为 2.36~4.75 mm。各项原材料主要性能的技术要求及试验结果见表 1。

表 1 原材料主要性能技术参数及试验结果

Tab. 1 Performance parameters and test results of raw materials

原材料	性能指标	试验结果	技术要求	试验方法
EA	拉伸强度(23℃)/MPa	6.19	≥5.0	ASTM D 638
	断裂延伸率(23℃)/%	257	≥190	ASTM D 638
	黏度增加至 1 Pa·s 的时间/min	35	≥20	ASTM D 4402
橡胶粉	灰分/%	5.8	≤8	GB/T 4498
	水分/%	0.4	≤1	GB/T 19208
	橡胶烃含量/%	47.5	≥42	GB/T 14837
	纤维含量/%	0.2	≤0.5	GB/T 19208
	断裂延伸率/%	570	≥500	GB/T 528
碎石	抗压强度/MPa	140	≥120	JTG E41-2005 T0221
	压碎值/%	8.6	≤12	JTG E41-2005 T0316
	细长颗粒含量/%	2.5	≤5	JTG E41-2005 T0312

将不同粒度及掺量的橡胶粉与 EA 混合,制成橡胶环氧沥青黏结料(REA),对其进行旋转黏度试验和直接拉伸试验,根据试验结果并结合钢桥面用防水黏结层的技术要求,确定橡胶粉的最佳粒度为 0.180 mm(80 目),最佳掺量为 4%。以最佳粒度和掺量制作 REA,表 2 为 EA 与 REA 的性能比较。

表 2 掺加橡胶粉前后环氧沥青黏结料的性能变化
Tab. 2 Performance changes of epoxy asphalt binder after adding rubber powder

性能指标	EA	REA	差值/%
黏度增加至 1 Pa·s 的时间/min	35	33	-5.7
拉伸强度(23℃)/MPa	6.19	6.91	11.6
断裂延伸率(23℃)/%	257	335	30.4
化学交联度(23℃)/%	1.1	25.0	2172.7
物理缠结(23℃)/%	70.5	176.7	150.6
劲度模量(-12℃)/MPa	510	407	20.2
黏结强度(23℃)/MPa	3.32	3.54	6.6

注:表中化学交联度和物理缠结 2 个指标,通过 Mooney-Rivlin 方程拟合拉伸试验应力应变曲线得到^[9];差值负值表示性能降低,正值表示性能提升。

由表 2 可知,REA 的化学交联度远大于 EA,这主要是由于橡胶粉的掺入,对 EA 进行沥青改性时,发生了化学反应,产生了新的化学交联;同时,添加

的橡胶粉形成了网络结构,与EA形成了一定程度的物理缠结,对EA的增韧效果做出了贡献。

REA的拉伸强度、断裂延伸率及与钢板的黏结强度相对于EA分别提升了11.6%,30.4%及6.6%,表现出更好的黏结性能、抗变形能力和低温柔韧性;黏度从0到1 Pa·s的时间略微减小,在实际工程中应相应地减小REA的施工容留时间。

对不同撒布量的REA以及碎石构成的橡胶环氧沥青碎石防水黏结层进行与钢板之间的拉拔试验,根据拉拔强度值确定REA及碎石的最佳撒布量分别是0.7 L/m²与3.0 kg/m²。

1.2 斜剪试验试件制作

首先将使用环氧富锌漆进行防腐涂装处理后的钢桥面板加工成尺寸为50 mm×50 mm×14 mm的试块若干个,将环氧沥青混合料车辙板试件加工成尺寸为50 mm×50 mm×26 mm的试块若干个;接着在钢桥面板试块上撒布配制好的REA,然后在REA上均匀地撒布碎石并压实;最后将车辙板试块压在由REA和碎石构成的REAS防水黏结层上,并在120℃的烘箱内固化6 h,制得REAS斜剪试件,如图1所示。其中,环氧沥青混合料车辙板所用的混合料由钢桥面用2910型国产环氧沥青结合料与密级配玄武岩集料以6.5%的油石比拌合而成^[10],该混合料强度较高,可以保证在后面的斜剪试验中不会出现车辙板试块被破坏的情况;REAS防水黏结层的REA撒布量和碎石撒布量分别是0.7 L/m²与3.0 kg/m²。同时,制作由钢桥面板试块、EA及环氧沥青混合料车辙板试块构成的EA斜剪试件,与REAS斜剪试件进行对比研究。

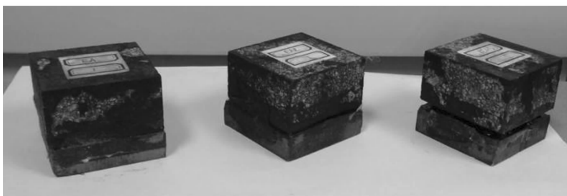


图1 斜剪试验试件

Fig.1 Specimens of oblique shear test

2 变剪切角斜剪试验及结果分析

2.1 斜剪试验原理

斜剪试验可以模拟不同正压力条件下的剪切工况,与桥面实际受力状况较为接近^[11],因此本文选择通过斜剪试验进行REAS防水黏结层界面抗剪性能测试,斜剪试验装置及其试验原理如图2所示。

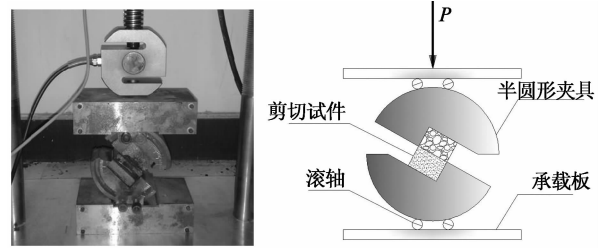


图2 斜剪试验装置及试验原理

Fig.2 Oblique shear test apparatus and principle

试件发生剪切破坏时的荷载为 P ,REAS防水黏结层的剪切界面正应力和抗剪强度分别按式(1)和式(2)计算。

$$\sigma = \frac{P \cos \alpha}{A}, \quad (1)$$

$$\tau = \frac{P \sin \alpha}{A}. \quad (2)$$

式中: σ 为剪切界面正应力; τ 为抗剪强度; P 为剪切破坏荷载; A 为受剪面积; α 为剪切角度,即剪切面与水平面的夹角。

2.2 变剪切角试验及分析

防水黏结层的抗剪强度与剪切角度密切相关,因此,文本选择多个剪切角度进行斜剪试验。文献[12-13]中的计算结果表明桥面铺装材料参数变化时,剪切角度一般在25°~30°之间,考虑桥面会存在一定坡度,剪切角度可能在25°~65°之间变化。因此,本文选取15°,30°,45°,60°及75°作为斜剪试验的剪切角度。为尽量模拟汽车快速行驶时的桥面受力状况,本文斜剪试验速率设为50 mm/min,试验温度设为23℃,REAS斜剪试件的试验结果如图3所示。

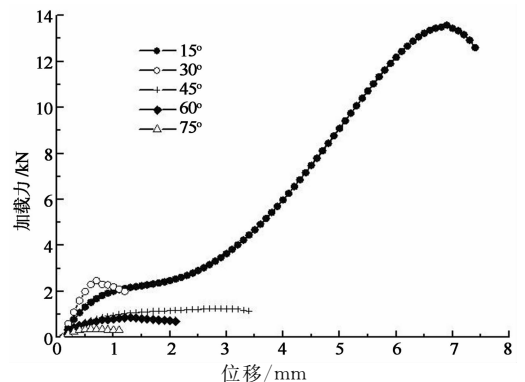


图3 不同剪切角度的力-位移曲线

Fig.3 Force-displacement curve under different shear angles

通过图3可以看出,随着剪切角度的增大,力-位移曲线越平缓,峰值荷载越小,表明越容易发生破

坏;而且当剪切角度越小时,剪切角度的变化对峰值荷载影响越大.按照式(1)和式(2)计算不同剪切角度下的抗剪强度和正应力,REAS斜剪试件及EA斜剪试件的计算结果见表3.

表 3 不同剪切角度下的试验结果

Tab. 3 Test results under different shear angles

剪切角度 / (°)	试件类型	破坏荷载 / kN	剪切位移 / mm	抗剪强度 / MPa	正应力 / MPa
15	REAS	13.68	6.75	1.42	5.29
	EA	10.54	6.01	1.09	4.08
30	REAS	2.47	0.76	0.49	0.86
	EA	2.08	0.74	0.41	0.72
45	REAS	1.24	2.98	0.35	0.35
	EA	0.91	2.40	0.26	0.26
60	REAS	0.87	1.42	0.30	0.17
	EA	0.52	1.03	0.18	0.10
75	REAS	0.37	0.93	0.14	0.04
	EA	0.19	0.49	0.07	0.02

由表 3 可以看出,相对于 EA 防水黏结层,REAS 防水黏结层的抗剪强度及剪切位移均有所提高,且提高的幅度随着剪切角度的增大而增大,表明 REAS 防水黏结层的抗剪性能优于 EA 防水黏结层,尤其在剪切角度较大时.根据表 3 中不同剪切角度时,REAS 防水黏结层的抗剪强度与剪切角度及剪切界面正应力的关系,作图 4 所示的关系曲线图.

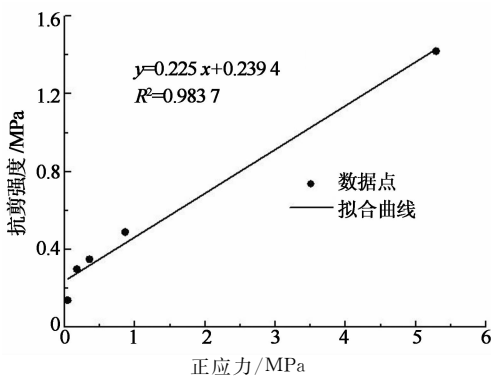
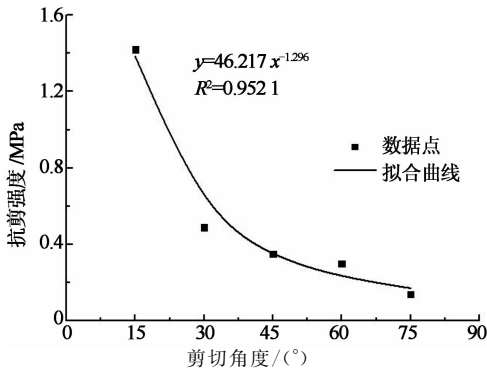


图 4 关系曲线图

Fig. 4 Relation curves

由图 4(a)可以看出,随着剪切角度的增大,REAS 防水黏结层的抗剪强度呈幂函数减小的趋势,剪切角度由 15°增至 30°过程中,REAS 防水黏结层的抗剪强度减小了 65.1%,剪切角度继续增大,抗剪强度趋于稳定.因此,在坡度较大桥段更容易发生桥面铺装的剪切破坏.

剪切角度不同时,由图 4(b)得到 REAS 防水黏结层剪切界面正应力和抗剪强度的线性拟合方程 $\tau = 0.2394 + 0.225\sigma$,引入土力学经典剪应力方程^[14]如式(3)所示:

$$\tau = c + \sigma \tan \varphi. \quad (3)$$

式中: σ 为剪切界面正应力; c 为黏聚力; τ 为抗剪强度; φ 为内摩擦角.

REAS 防水黏结层中,REA 提供黏聚力,粗糙的碎石界面提供内摩擦角,通过式(3)以及剪切界面正应力和抗剪强度的线性拟合方程可以计算出 REAS 防水黏结层的黏聚力为 0.24 MPa,内摩擦角为 12.7°.

3 冻融循环斜剪试验及结果分析

3.1 冻融循环斜剪试验

钢桥面铺装结构完全处于自然环境中,经受高温浸水和冰冻作用,对防水黏结层的性能要求更高^[15].为评价冻融循环作用对 REAS 防水黏结层及 EA 防水黏结层抗剪强度的影响,本文设计不同冻融循环次数下的斜剪试验,冻融循环周期为“-15℃低温 8 h+60℃水浴 16 h”,剪切角度为 15°,剪切速率为 50 mm/min,试验温度为 23℃,试验结果见表 4.

表 4 不同冻融循环次数下的试验结果

Tab. 4 Test results under different freeze-thaw cycle times

冻融循环次数	试件类型	破坏荷载 / kN	剪切位移 / mm	抗剪强度 / MPa	正应力 / MPa
0	REAS	13.68	6.75	1.42	5.29
	EA	10.54	6.01	1.09	4.08
1	REAS	13.11	7.31	1.36	5.07
	EA	10.02	6.13	1.04	3.88
2	REAS	12.81	6.00	1.33	4.95
	EA	9.53	5.16	0.99	3.68
3	REAS	12.47	5.14	1.29	4.82
	EA	8.83	4.02	0.91	3.41
4	REAS	10.20	5.27	1.06	3.94
	EA	5.67	3.89	0.59	2.19
5	REAS	8.63	8.00	0.89	3.33
	EA	4.33	4.19	0.45	1.67

由表4可以看出,不同冻融循环次数下,REAS防水黏结层的抗剪强度及剪切位移均大于EA防水黏结层.5次冻融循环作用后,相对于EA防水黏结层,REAS防水黏结层的抗剪强度及剪切位移分别提高了97.8%及90.9%.

为了更加直观地评价冻融循环作用对REAS防水黏结层抗剪强度的影响程度,本文引入冻融循环抗剪强度比,即试件经 n 次冻融循环后抗剪强度与为未经冻融循环抗剪强度的百分比,如图5所示.

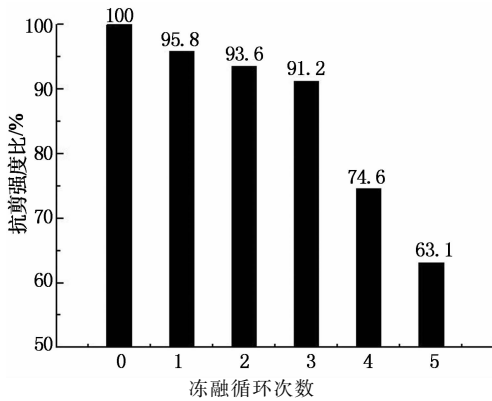


图5 冻融循环次数与抗剪强度比的关系
Fig. 5 Relation between freeze-thaw cycle times and shear strength ratio

由图5可知,随着冻融循环次数的增加,REAS防水黏结层的抗剪强度呈抛物线型衰减,经过3次冻融循环作用后,抗剪强度比仍在90%以上,抗剪性能比较稳定;5次冻融循环作用后,抗剪强度比降至63.1%,性能下降显著.同时,剪切界面出现明显的水损坏,粒径偏大的碎石基本脱落,沥青层多处发生剥落,表明多次冻融循环将加速黏结界面的破坏,冻融循环作用对REAS防水黏结层的抗剪性能影响显著.

3.2 能量法理论分析

为深入了解REAS防水黏结层的剪切破坏过程,剖析剪切破坏机理,引入剪切耗散能指标,具体表示斜剪设备由加载至试件发生剪切破坏需要损耗的能量,按式(4)计算.

$$W_{\tau} = \int_0^{l_{\tau}} F dl. \quad (4)$$

式中: W_{τ} 为剪切耗散能; F 为加载力; l 为竖向位移; l_{τ} 为剪切破坏时的位移.对不同冻融循环次数的REAS斜剪试件的力-位移曲线进行积分,得到剪切耗散能,如图6所示.

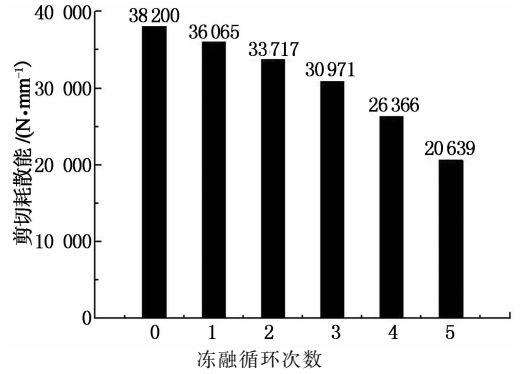


图6 不同冻融循环次数的剪切耗散能计算结果

Fig. 6 Calculation results of shear dissipated energy under different freeze-thaw cycle times

从图6可知,随着冻融循环次数的增加,REAS防水黏结层的剪切耗散能呈减小趋势,且减小的速度越来越快,与冻融循环抗剪强度比的变化规律基本一致.5次冻融循环后剪切耗散能较未冻融减小了46.0%,可见冻融循环将显著影响REAS防水黏结层的抗剪性能.

4 结论

1)掺入橡胶粉后的环氧沥青黏结料体系内形成了新的化学交联和物理缠结,拉伸强度、断裂延伸率及与钢板的黏结强度分别提升了11.6%,30.4%及6.6%,表现出更好的黏结性能、抗变形能力和低温柔韧性.

2)不同的剪切角度及冻融循环次数下,REAS防水黏结层的抗剪强度及剪切位移均大于EA防水黏结层,表现出更好的抗剪性能.

3)随着剪切角度的增大,REAS防水黏结层的抗剪强度呈幂函数减小的趋势;不同剪切角度时,REAS防水黏结层的剪切界面正应力和抗剪强度呈线性变化,通过其拟合方程得到REAS防水黏结层的黏聚力为0.24 MPa,内摩擦角为12.7°.

4)随着冻融循环次数的增加,REAS防水黏结层的抗剪强度呈抛物线型衰减;经过3次冻融循环作用后,REAS防水黏结层的冻融循环抗剪强度比仍在90%以上,抗剪性能比较稳定,5次冻融循环作用后,冻融循环抗剪强度比降至63.1%,抗剪强度下降显著;剪切耗散能随冻融循环次数变化的规律与抗剪强度基本一致,表明多次冻融循环将加速铺装界面的破坏,冻融循环作用对REAS防水黏结层的抗剪性能影响显著.

参考文献

- [1] MARTINELLI P. Bridge deck waterproof membrane evaluation[J]. *Journal of Material Science*, 1996, 9: 281-289.
- [2] UZAN J, MOTOLA Y. Damage evaluation in simple shear tests with and without stress reversal of asphalt concrete[J]. *Road Materials and Pavement Design*, 2006, 7(1): 71-86.
- [3] 李嘉, 冯啸天, 邵旭东, 等. 正交异性钢桥面-RPC薄层组合铺装体系研究[J]. *湖南大学学报: 自然科学版*, 2012, 39(12): 7-12.
LI Jia, FENG Xiao-tian, SHAO Xu-dong, *et al.* Research on composite paving system with orthotropic steel bridge deck and thin RPC layer[J]. *Journal of Hunan University: Natural Sciences*, 2012, 39(12): 7-12. (In Chinese)
- [4] POTGIETER C J. Bitumen rubber chip and spray seals in South Africa[C]//*Proceedings of the 3rd Eurasphalt and Eurobitume Congress Vienna*. Vienna: Transport Research Laboratory, 2004: 713-722.
- [5] 闵召辉, 孔冬雷, 黄卫. 钢桥面铺装用环氧沥青混合料低温断裂性能[J]. *建筑材料学报*, 2012, 15(1): 91-95.
MIN Zhao-hui, KONG Dong-lei, HUANG Wei. Fracture characteristic of epoxy resin asphalt mixes for steel deck pavement at low temperatures[J]. *Journal of Building Materials*, 2012, 15(1): 91-95. (In Chinese)
- [6] 何立平, 申爱琴, 谢成, 等. 橡胶沥青结合料性能正交试验[J]. *长安大学学报: 自然科学版*, 2014, 34(1): 7-12.
HE Li-ping, SHEN Ai-qin, XIE Cheng, *et al.* Orthogonal test for rubber asphalt properties[J]. *Journal of Chang'an University: Natural Sciences*, 2014, 34(1): 7-12. (In Chinese)
- [7] 何亮, 马育, 马涛. 橡胶沥青及其老化特性研究[J]. *建筑材料学报*, 2013, 16(2): 370-374.
HE Liang, MA Yu, MA Tao. Research on asphalt rubber and its aging performance [J]. *Journal of Building Materials*, 2013, 16(2): 370-374. (In Chinese)
- [8] 钱振东, 王睿, 陈团结. 橡胶粉掺量对环氧沥青及其混合料性能的影响[J]. *建筑材料学报*, 2014, 17(2): 331-335.
QIAN Zhen-dong, WANG Rui, CHEN Tuan-jie. Performance of epoxy asphalt and its mixture under different rubber powder dosages[J]. *Journal of Building Materials*, 2014, 17(2): 331-335. (In Chinese)
- [9] 孔庆磊, 王帅, 王桂珍, 等. 废橡胶粉增韧环氧沥青及其机理研究[J]. *化工时刊*, 2013, 27(12): 4-7.
KONG Qing-lei, WANG Shuai, WANG Gui-zhen, *et al.* Preparation and mechanism of crumb rubber toughened epoxy asphalt[J]. *Chemical Industry Times*, 2013, 27(12): 4-7. (In Chinese)
- [10] 陈磊磊, 钱振东. 基于简单性能试验的环氧沥青混合料动态模量研究[J]. *建筑材料学报*, 2013, 16(2): 341-344.
CHEN Lei-lei, Qian Zhen-dong. Study on dynamic modulus of epoxy asphalt mixture based on simple performance test[J]. *Journal of Building Materials*, 2013, 16(2): 341-344. (In Chinese)
- [11] 樊叶华, 黄卫, 王敬民, 等. 江阴大桥钢桥面柔性防水黏结层特性分析[J]. *公路交通科技*, 2007, 24(6): 33-36.
FAN Ye-hua, HUANG Wei, WANG Jing-min, *et al.* Research on interface cohesiveness of the waterproofing system for Jiangyin Bridge[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2007, 24(6): 33-36. (In Chinese)
- [12] HU C H, QIAN J. Shear stress analysis of long-span steel bridge deck asphalt pavement using FEM[J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 304: 12-17.
- [13] 顾兴宇, 王文达. 水泥混凝土桥面黏结层抗剪性能要求及简化计算[J]. *交通运输工程学报*, 2010, 10(2): 20-25.
GU Xing-yu, WANG Wen-da. Shear property demands of binding layer on concrete bridge pavement and simplified calculation[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2010, 10(2): 20-25. (In Chinese)
- [14] 邵生俊, 许萍, 陈昌禄. 土的剪切空间滑动面分析及各向异性强度准则研究[J]. *岩土工程学报*, 2013, 35(3): 422-435.
SHAO Sheng-jun, XU Ping, CHEN Chang-lu. Several shear spatially mobilized planes and anisotropic strength criteria of soils[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, 35(3): 422-435. (In Chinese)
- [15] 刘聪慧. 几种水泥混凝土桥面防水黏结层性能研究[D]. 武汉: 武汉理工大学材料科学与工程学院, 2009: 1-20.
LIU Cong-hui. Research on properties of several waterproof and cohesive layers for concrete bridges deck[D]. Wuhan: College of Materials Science and Engineering, Wuhan University of Technology, 2009: 1-20. (In Chinese)