

水泥-乳化沥青混凝土的路用性能研究

逯艳华^{1,2}, 武泽锋³

(1. 东北大学资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110004; 2. 辽宁省交通运输事业发展中心工程质量部, 辽宁 沈阳 110003; 3. 辽宁省交通运输事业发展中心建设养护部, 辽宁 沈阳 110005)

摘要 目的 为确保水泥-乳化沥青具有良好的使用性能, 全面准确评价材料的路用性能. 方法 根据水泥-乳化沥青混凝土材料特性, 通过室内试验, 研究该材料相关试件制备、成型与方法, 对其高温性能、低温性能、感温性能、防水性能及力学性能进行测试与分析. 结果 揭示了水泥用量、乳化沥青用量及油灰比对其材料特性的影响规律. 研究表明, 水泥-乳化沥青混凝土兼顾高、低温性能, 具有良好的水稳定性和抗干缩性能; 强度和回弹模量与油灰比成反比, 感温性与油灰比成正比. 水泥-乳化沥青混凝土具有很好的防水性与高低温性能. 结论 在实际应用中, 可根据不同的工程需要, 通过调整油灰配比来调整材料的刚-柔特性.

关键词 水泥-乳化沥青混凝土; 油灰比; 水稳定性; 抗干缩性能; 感温性; 刚-柔特性

中图分类号 TU528.01

文献标志码 A

Research on Road Performance of Cement-emulsified Asphalt Concrete

LU Yanhua^{1,2}, WU Zefeng³

(1. School of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang, China, 110004; 2. Engineering Quality Department of Liaoning Transportation Development Center, Shenyang, China, 110003; 3. Construction and Maintenance Department of Liaoning Transportation Development Center, Shenyang, China, 110005)

Abstract: In order to ensure good performance of cement-emulsified asphalt, and evaluate the road performance of materials comprehensively and accurately, according to the characteristics of cement-emulsified asphalt concrete materials, the preparation, forming and method of the specimen were discussed through laboratory tests. Based on analyzing of the tests on high temperature performance, low temperature performance, temperature sensing performance, waterproof performance and mechanical properties of cement-emulsified asphalt concrete, the influences of cement dosage, emulsified asphalt dosage and oil-cement ratio on its material properties are revealed. Research shows that cement-emulsified asphalt concrete has good performance under both low and high temperature conditions; it has good water stability and dry shrinkage resistance; the strength and modu-

收稿日期: 2018-05-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(11102118); 辽宁省优秀人才基金项目(KR2015046); 清华大学国家重点实验室基金项目(sklhse-2016-C-01)

作者简介: 逯艳华(1974—), 女, 教授研究员级高级工程师, 博士研究生, 主要从事桥梁铺装力学等方面研究.

lus of resilience are inversely proportional to the oil-cement ratio;the temperature sensitivity is proportional to the oil-cement ratio. Therefore ,the cement-emulsified asphalt concrete has good water resistance and high and low temperature performance. Meanwhile in practical applications ,its stiffness-softness characteristics of the material can be adjusted by adjusting the oil-cement ratio according to different engineering needs.

Key words: cement-emulsified asphalt concrete; oil-cement ratio; water stability; dry shrinkage resistance; temperature sensitivity; rigid-flexible characteristics

水泥-乳化沥青混凝土作为路用材料,由于在性能方面兼具水泥混凝土和沥青混凝土特点而具有半柔性的特性^[1]. 与传统的沥青混凝土及水泥混凝土比较,乳化沥青的加入,降低了水泥混凝土的模量,从而提高了韧性,水泥的加入,改善了沥青混合料的低温抗裂性和温度敏感性,并提高了抗压强度^[2],水泥-乳化沥青复合材料在实际工程应用中,表现出了良好的路用性能^[3]. 近年来,国内外众多专家对水泥-乳化沥青混凝土的路用性能进行了研究,得出许多有价值的结论^[4-5]. 但由于所选用材料不同以及拌和、成型等试验方法没有统一标准等原因,导致研究结果差异较大,在一定程度上阻碍了该项技术在工程领域的推广和应用^[6]. 水泥-乳化沥青应用的关键技术是探讨油灰比对其感温性和力学等性能的影响规律,据此,笔者通过室内试验研究乳化沥青与水泥在不同用量和比例情况下高温稳定性、低温抗裂性、感温性能、防水性能、干缩性和力学性能等指标^[7-13],分析其变化规律,验证了水泥-乳化沥青良好的路用性能.

1 试验

1.1 材料

1.1.1 乳化沥青

乳化沥青与混合料的可拌合时间不小于120 s. 同时为增加混合料沥青膜厚度和加快固化成型速度,要尽可能提高乳化沥青的固化物含量^[14]. 经材料试验,基质沥青采用盘锦产90#重交通沥青,乳化方案采用非离子乳化剂复配阴离子乳化剂. 基本乳化条件为

皂液温度 60 ℃,沥青温度 120 ℃,沥青质量分数为 65%.

1.1.2 水泥

经材料试验,选定辽宁山水工源普通硅酸盐水泥(42.5 级).

1.1.3 集料

采用洁净的石灰岩石屑作为碱性细集料和矿粉使用. 另外,通过可拌合试验发现,石屑碱性越强混合料稠度、粘附性、可拌合时间、固化时间、抗压强度等指标越好. 经材料试验,选定辽宁省抚顺县石文镇生产的石灰岩,混合料集料合成级配如图1所示.

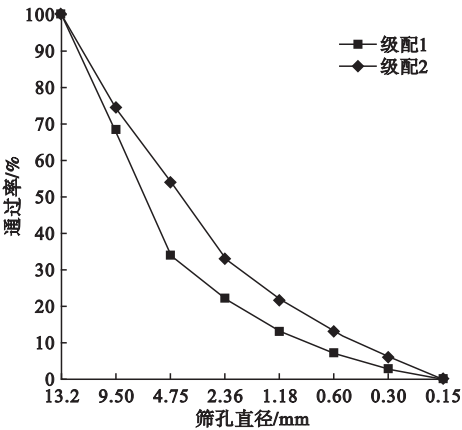


图1 矿料合成级配

Fig. 1 Synthetic gradation of mineral materials

1.1.4 外加剂

外加剂与水泥应具备良好的相容性,同时对乳化沥青的性能没有显著影响. 经材料试验,选择沈阳前程外加剂厂早强减水剂和消泡剂.

1.2 试验方法

1.2.1 试验规程

水泥-乳化沥青混凝土的高温稳定性、

低温抗裂性和水稳定性试验参照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20-2011)相关规定进行.抗渗性、抗压和抗弯拉强度及回弹模量和干缩性参照《公路工程水泥及水泥混凝土试验规程》(JTG E30-2005)相关规定进行.

1.2.2 配合比

经试验对比,确定级配1混合料的基准配合比为 $m(\text{水泥}):m(\text{水}):m(\text{乳化沥青}):m(\text{减水剂}):m(\text{集料})=1:0.9:2:0.005:21$,级配2混合料的基准配合比为 $m(\text{水泥}):m(\text{水}):m(\text{乳化沥青}):m(\text{减水剂}):m(\text{集料})=1:1.05:2.2:0.005:20.26$,即水泥用量为4%,乳化沥青用量为8%,油灰质量比为2:1(沥青与水泥的质量比为1:3).并以此为基准,改变水泥与乳化沥青用量,用水量则随试件最佳密度或根据拌和效果凭经验判断进行调整.

1.2.3 试件成型

经可拌和试验得出最佳拌和顺序,即先将集料和水泥干拌,然后加入适量含有一定

比例外加剂的水拌和润湿,最后加入乳化沥青均匀搅拌,确保混合料塌落度40~50 mm.混合料在水泥混凝土振动台上成型,为防止沥青与水泥离析,振动时间不宜超过80 s.之后根据乳化沥青的破乳及水泥的初凝时间,混合料在室温条件下于试模内静置1 h,再按各项试验要求施压制作试件.

2 性能分析

2.1 高温稳定性

采用沥青混合料高温车辙试验评价水泥-乳化沥青混凝土的高温性能,试件成型及养生方法如下:混合料入模静置1 h后,双面各击实50下,放入60℃的烘箱内通风养生4 h,取出后再次双面击实各25下,然后继续放入60℃的烘箱内通风养生20 h,最后在室温条件静置24 h,自然冷却脱模进行试压,进行马歇尔稳定度和动稳定度试验.保持乳化沥青用量不变,不同油灰质量比对应的试验每组试件为6个,每组试验取平均值,结果见表1.

表1 水泥-乳化沥青混凝土高温稳定性试验结果

Table 1 Test results of high-temperature stability of cement-emulsified asphalt concrete				
乳化沥青质量分数/%	水泥质量分数/%	沥青混合料标准马歇尔试验(60℃)		沥青混合料车辙试验(60℃)
		稳定度/MPa	流值/mm	动稳定度/(次·mm ⁻¹)
8	0	5.21	3.01	632
8	2	9.37	1.88	8 103
8	3	11.18	1.68	12 845
8	4	13.24	1.21	13 932

由表1可知,当水泥质量分数达到2%时,混合料马歇尔稳定度为不掺水泥的1.8倍,动稳定度增加近15倍,满足特重、重交通道路抗车辙指标要求($\geq 6\,000$ 次/mm).动稳定度随着水泥用量的增加而大幅度提高,但超过3%时混合料高温性能对水泥用量变化的敏感性降低.之所以水泥可以显著提高乳化沥青混合料高温稳定性,主要是由于水泥水产物与沥青胶浆相互交织形成水泥-沥青胶浆^[15-16],增加了混合料的刚性,延缓了

高温下劲度模量降低的趋势,提高了荷载作用下的抗变形能力和抗流动变形能力.可见,水泥-乳化沥青混合料具有良好的高温稳定性.

2.2 低温抗裂性

沥青混凝土可以用低温弯拉应变来评价其低温抗裂性能^[17].一般来说,乳化沥青混凝土加入水泥后,低温弯拉应变减小,但弯拉应力增大.因此,单独用应力和应变指标来评价混合料的低温性能是不全面和不准确的.

引入应变能密度^[18]来评价水泥-乳化沥青混凝土低温抗裂性能,即通过混合料劈裂试验测得混凝土在低温破坏时弯拉应力与弯拉应变值,计算破坏时应力应变曲线包围面积的大小.应变能密度综合反映混合料抗裂能

力,可以科学地评价水泥-乳化沥青的低温性能.试验条件为温度-10℃,加载速率1 mm/min.保持乳化沥青用量不变,不同油灰质量比对应的试验每组试件为6个,每组试验取平均值,结果见表2.

表 2 水泥-乳化沥青混凝土低温抗裂性能试验结果

Table 2 Test results of low-temperature cracking resistance of cement-emulsified asphalt concrete					
乳化沥青质量分数/%	水泥质量分数/%	弯拉应力/MPa	弯拉应变/10 ⁶	劲度模量/MPa	应变能密度/(kJ·m ⁻³)
8	0	0.80	3 021	613	1.21
8	2	1.53	1 903	1 584	1.46
8	3	1.87	1 391	2 445	1.30
8	4	1.91	1 291	2 635	1.23

由表2可知,当水泥质量分数增加到2%时,水泥-乳化沥青混凝土应变能密度明显增加.当水泥质量分数由2%增加到4%时,水泥-乳化沥青混凝土应变能密度变化明显减缓,并略有减小趋势.可见,加入适量水泥能在一定程度上提高水泥-乳化沥青混凝土的低温抗裂性能.当水泥质量分数超过2%时,混合料低温性能指标反而呈现降低趋势.

2.3 防水性能

2.3.1 水稳定性

水泥混凝土一般不评价其水稳定性,但有研究认为向乳化沥青混合料中加入水泥可显著提高其抗水损害性能^[19].因此,采用浸水马歇尔试验和冻融劈裂试验评价混合料的水稳定性.保持乳化沥青用量不变,不同油灰质量比对应的试验每组试件为6个,每组试验取平均值,结果见表3.

表 3 水泥-乳化沥青混凝土抗水损害性能试验结果

Table 3 Test results of water-resistant performance of cement-emulsified asphalt concrete				%
乳化沥青质量分数	水泥质量分数	浸水马歇尔试验残留稳定度	冻融劈裂强度比	
8	0	63	50	
8	2	89	81	
8	3	91	87	
8	4	92	91	

由表3可知,乳化沥青混凝土加入水泥后残留稳定度和冻融劈裂强度显著提高.当水泥质量分数达到4%时,混合料的残留稳定度和冻融劈裂强度比增加1.4倍以上.当水泥质量分数超过2%时,水稳定性随着水泥质量分数增加而增长的趋势减缓.

2.3.2 抗渗性

防渗水性能是桥面铺装材料的一个重要指标,沥青混凝土用渗水系数来评价,水泥混凝土用抗渗等级或渗水高度来评价^[20].考虑

到沥青与水泥材料特性不同,采用渗水高度来评价水泥-乳化沥青混凝土的防水性能.试验时使用玻璃板测量高度值变化,试件为150 mm×150 mm×150 mm圆柱体,采用级配1和级配2作为对比,养生期以14 d为宜.由于水泥-乳化沥青混凝土较为密实,将试验压力值调整为1.2 MPa.利用抗渗试验机给试件施加水压并保持24 h,取出试件劈开后观察渗水痕迹,并按规定方法量测渗水高度.保持水泥用量不变,不同油灰质量比对

应试验结果如图2所示。

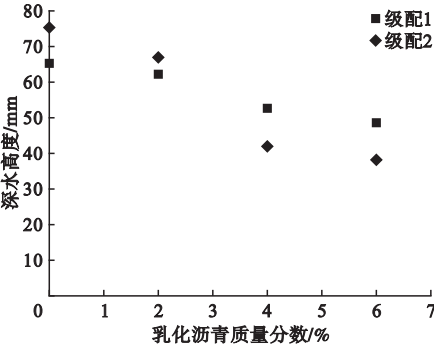


图2 水泥质量分数4%时水泥-乳化沥青混凝土渗水高度

Fig. 2 Test results of cement emulsified asphalt concrete penetration height (cement dosage 4%)

由图2可见,水泥混凝土中加入乳化沥青后,试件的渗水高度明显降低,材料的抗渗性能显著提高,而且含细集料较多的级配1比级配2对乳化沥青加入的敏感性更强。

2.4 干缩性

干缩性是水泥-乳化沥青混凝土重要的性能指标,主要取决于混合料的外加水量。而外加水量对水泥-乳化沥青混凝土拌和与成型后的性能有很大的影响^[21]:外加水太少,则乳化沥青可能提前破乳,或拌和困难,或导致沥青与水泥分布不均匀导致混合料不密实;反之外加水过多,混合料固化速度慢、孔隙率大成型后密度小,综合性能较差。

配合比参数中,乳化沥青质量分数达到8%、含水比例30%,对混合料外加水量有较大的影响。因此,在水泥用量不变的条件下调整油灰比进行干缩性试验。试件长宽高100 mm×100 mm×400 mm,拌和时须剔除粒径大于26.5 mm的粗集料。采用级配1和级配2作为对比,考虑乳化沥青的影响,试件带模养生2 d,试验结果见图3。

由图3可见,尽管水泥-乳化沥青混凝土的干缩系数没有明显变化规律,但随着乳化沥青用量增加干缩系数仍呈现出增大趋势。这是因为在保证乳化沥青不破乳并满足

拌和要求的前提下,水泥-乳化沥青混凝土的外加水量相比同级配的水泥混凝土要多,即水灰比变大,从而导致混合料的干缩系数相对较大。

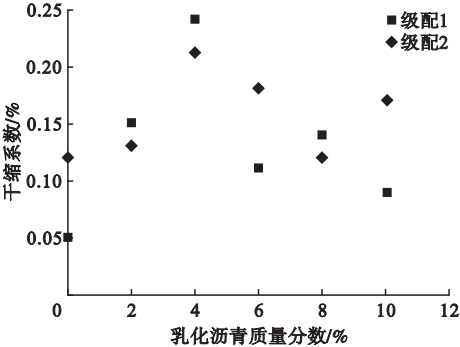


图3 水泥质量分数4%时乳化沥青用量与干缩系数关系

Fig. 3 Relationship between emulsified asphalt content and dry shrinkage factor test results

除乳化沥青用量外,研究养生时间对水泥-乳化沥青混凝土干缩值的影响在工程应用中更为重要。设定水泥质量分数4%不变,采用级配1集料,逐步提高油灰比使乳化沥青用量达到10%,同条件不同养生时间对应的干缩值变化情况如图4所示。

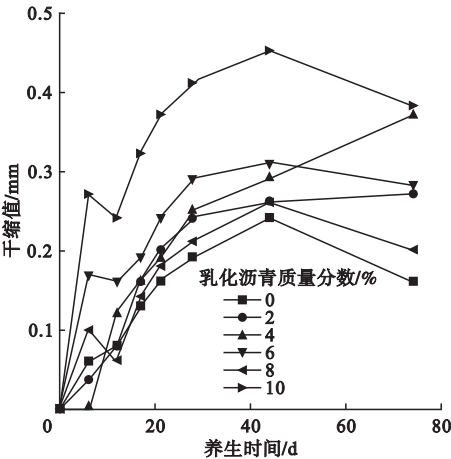


图4 水泥质量分数4%时乳化沥青质量分数与干缩值量关系

Fig. 4 Relationships between emulsified asphalt content and dry shrinkage measurement

由图4可见,干缩值在水泥-乳化沥青混凝土形成强度的初期阶段变化较大,随着养生时间增加而增大。在养生期达到28 d

后,干缩值趋于稳定.

水泥-乳化沥青混凝土干缩性与水分散失率也有重要相关关系,有必要进一步研究水泥用量对水分散失的影响规律. 设定乳化沥青质量分数 8% 不变,采用级配 1 集料,不同油灰比对应的水损失试验结果见图 5.

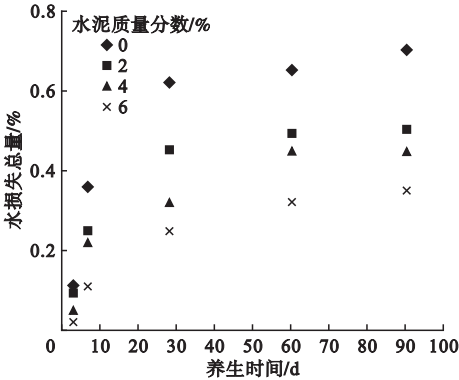


图 5 乳化沥青质量分数 8% 时水泥质量分数与水泥-乳化沥青混凝土试件水分散失总量的关系

Fig. 5 Relationships between cement content and total water loss of cement-emulsified asphalt concrete

由图 5 可见,水泥用量越高试件水分损失越小,相应地干缩系数小、孔隙率低、成型快、强度好.可见,油灰质量比与水分损失成反比关系.

2.5 力学性能

2.5.1 强度

抗压和抗弯拉力学指标是水泥-乳化沥青混凝土的主要路用性能之一^[22]. 设定水泥质量分数 4% 不变,调整油灰质量比对应的 28 d 抗压和抗弯拉强度如图 6、图 7 所示;设定乳化沥青质量分数 8% 不变,调整油灰质量比对应的 28 d 抗压和抗弯拉强度如图 8、图 9 所示. 由图 6~图 9 可见,水泥用量不变时,抗压和抗弯拉强度随着乳化沥青含量的增加而减小;乳化沥青含量不变时,抗压和抗弯拉强度随着水泥含量的增加而增大. 可见,水泥-乳化沥青混凝土的强度受水泥和乳化沥青用量影响较大,刚性与油灰质量比呈反

比关系.

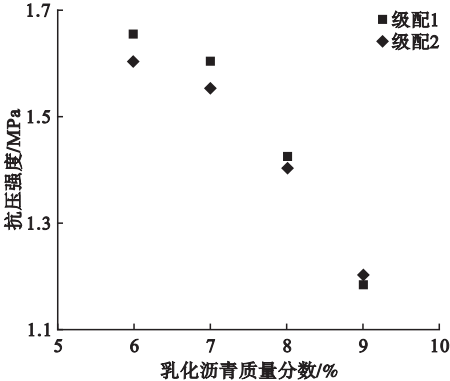


图 6 乳化沥青用量(水泥质量分数 4%) 对抗压强度的影响

Fig. 6 Effect of emulsified asphalt content on compressive strength

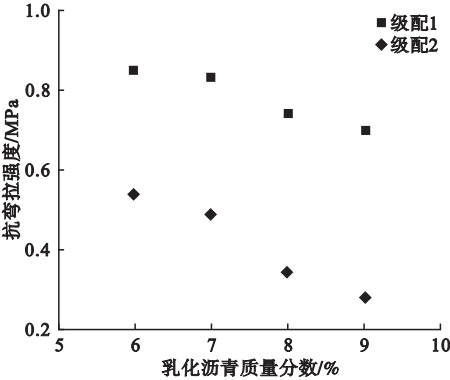


图 7 乳化沥青用量(水泥质量分数 4%) 与抗弯拉强度关系

Fig. 7 Relations between emulsified asphalt content and flexural strength

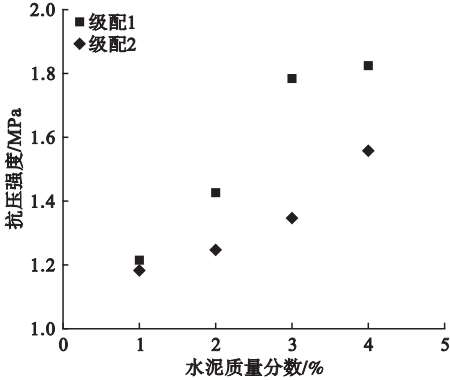


图 8 水泥用量(乳化沥青质量分数 8%) 对抗压强度的影响

Fig. 8 Effect of cement content on compressive strength

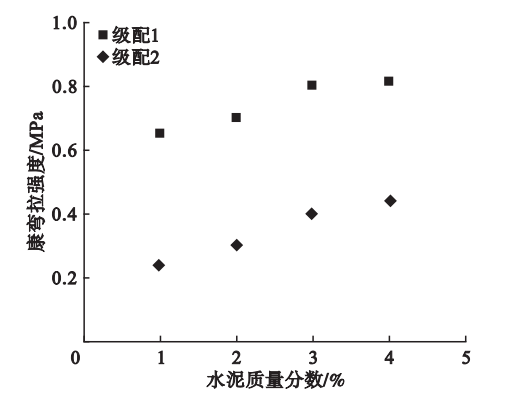


图9 水泥用量(乳化沥青质量分数8%)对抗弯拉强度的影响

Fig. 9 Effect of cement content on flexural strength

2.5.2 回弹模量

设定水泥质量分数4%不变,调整油灰质量比对应的28 d 抗压和抗弯拉回弹模量如图10、图11所示;再设定乳化沥青质量分数8%不变,调整油灰质量比对应的28 d 抗压和抗弯拉回弹模量如图12、图13所示.由图10~图13可见,水泥用量不变时,抗压和抗弯拉回弹模量随着乳化沥青含量的增加而减小;乳化沥青用量不变,抗压和抗弯拉回弹模量随着水泥含量的增加而增大.可见,水泥-乳化沥青混凝土的回弹模量水泥和乳化沥青用量影响较大,变化规律与强度指标相似,即柔性与油灰质量比呈正比关系.

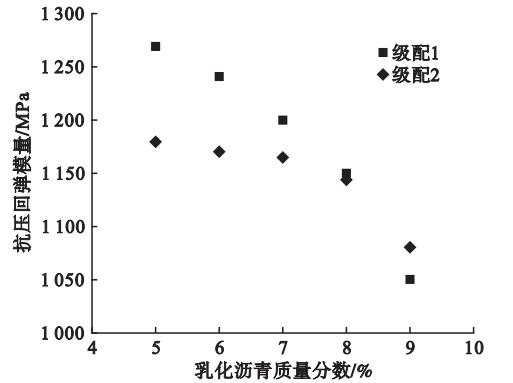


图10 乳化沥青用量(水泥质量分数4%)对抗压回弹模量的影响

Fig. 10 Effect of emulsified bitumen content on compressive rebound modulus

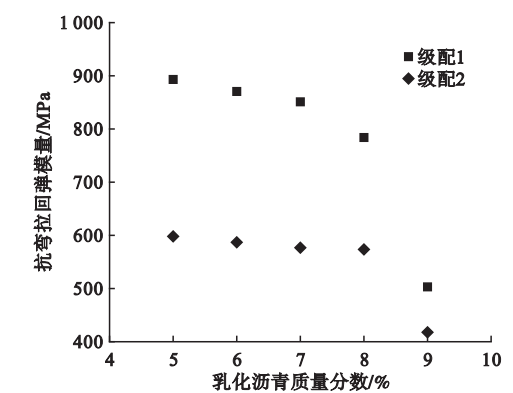


图11 乳化沥青用量(水泥质量分数4%)对抗弯拉回弹模量的影响

Fig. 11 Effect of emulsified asphalt content on flexural modulus

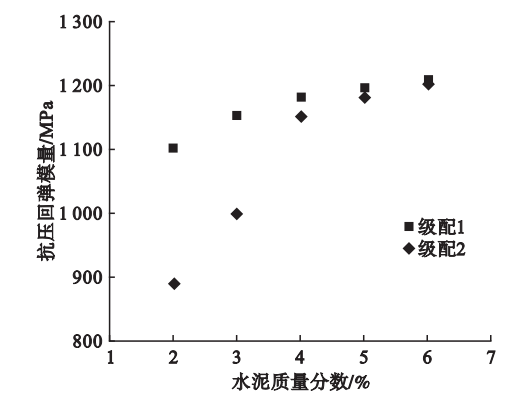


图12 水泥用量(乳化沥青质量分数8%)对抗压回弹模量的影响

Fig. 12 Effect of cement content on compressive rebound modulus

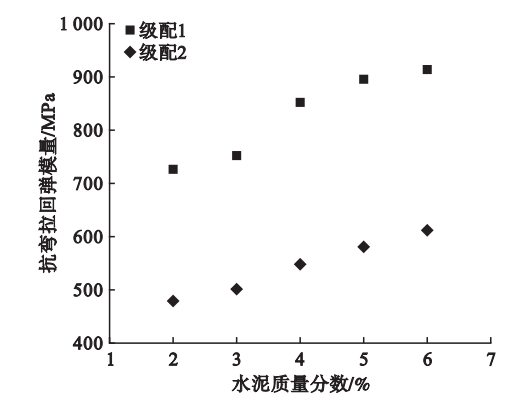


图13 水泥用量(乳化沥青质量分数8%)对抗弯拉回弹模量的影响

Fig. 13 Effect of cement content on flexural modulus

2.6 感温性能

为评价水泥-乳化沥青混凝土的感温性,集料采用级配1,设定乳化沥青质量分数8%,调整油灰质量比进行不同温度条件下抗压回弹模量试验,结果如图14所示。

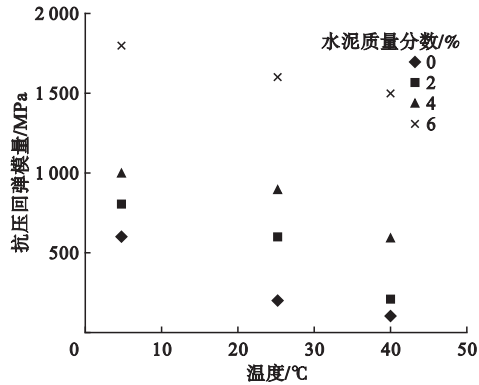


图14 水泥-乳化沥青混凝土抗压回弹模量与温度的关系

Fig. 14 Relationship between temperature and compressive rebound modulus of cement-emulsified asphalt concrete

由图14可见,抗压回弹模量随着试验温度提高呈现明显减小趋势,表明水泥混凝土加入乳化沥青后增强;水泥用量越大,抗压回弹模量随着试验温度升高而降低的趋势越不明显。即水泥含量越大感温性越弱,乳化沥青含量越大感温性越强。可见,水泥-乳化沥青混凝土的感温性与油灰质量比呈正比关系。一般认为,沥青混凝土的回弹模量测试结果受试验温度影响较大^[23]。研究表明,加入水泥后,温度对乳化沥青混凝土的回弹模量也有一定的影响,但影响较小。

3 结 论

(1)加入水泥后,乳化沥青混合料的低温性能损失不大,但高温稳定性大幅度提高;在最佳油灰质量比条件下,水泥-乳化沥青混凝土具有优良的高温稳定性,同时兼顾低温抗裂性能。

(2)加入乳化沥青后,水泥混凝土的抗干缩性能损失不大,水稳定性大幅度提高;在

最佳油灰质量比条件下,水泥-乳化沥青混凝土具有优良的水稳定性,同时兼顾抗干缩性能。

(3)加入水泥后,乳化沥青混合料的强度和回弹模量大幅度提高,刚性特点明显增强;加入乳化沥青后,水泥混凝土的强度和回弹模量呈降低趋势,柔性特点逐步显现。即水泥-乳化沥青混凝土的柔性与油灰质量比成正比关系,刚性与油灰质量比成反比关系。

(4)加入水泥后,乳化沥青混合料的感温性明显减弱,相应地抗高温变形能力明显增强;加入乳化沥青后,水泥混凝土的感温性呈增强趋势,相应地低温抗裂能力有一定程度提高。即水泥-乳化沥青混凝土的感温性与油灰质量比成正比关系。

参考文献

[1] 王舜. 水泥乳化沥青冷再生混合料性能评价[J]. 公路工程, 2012(1): 171-174.
(WANG Shun. Performance evaluation of cement emulsified asphalt cold recycled mixture [J]. Highway engineering, 2012, (1): 171-174.)

[2] 丁成志. 乳化沥青冷再生材料影响因素及性能分析[J]. 北方交通, 2013, 6: 52-54.
(DING Chengzhi. Influence factors and performance analysis of emulsified asphalt cold recycling materials [J]. Northern traffic, 2013, 6: 52-54.)

[3] 张海波. 乳化沥青冷再生混合料设计方法及路用性能研究[J]. 交通科技, 2016(4): 120-123.
(ZHANG Haibo. Emulsified asphalt cold recycling mixture design method and road performance research [J]. Traffic science and technology, 2016(4): 120-123.)

[4] 沈凡. 水泥-乳化沥青-水性环氧复合胶结钢桥面铺装材料研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2012.
(SHEN Fan. Cement emulsified asphalt waterborne epoxy composite cemented steel deck pavement material [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2012.)

[5] WANG X Y, XIA L. Analysis of cause for quality problems of cement emulsified asphalt mortar and prevention [J]. Journal of railway engineering society, 2012, 166(7): 57-61

[6] 肖曼. 厂拌乳化沥青冷再生在公路中的应用研究[D]. 西安: 长安大学, 2014.
(XIAO Man. Study on the application of plant mixed emulsified asphalt cold recycling in highway [D]. Xi'an: Chang'an University,

2014.)
- [7] 田冬梅,元强,朱蓉,等.水对水泥乳化沥青砂浆静态力学性能的影响[J].硅酸盐学报,2012,40(11):1544-1552.
(TIAN Dongmei, YUAN Qiang, ZHU Rong, et al. Influence of water on static mechanical properties of cement emulsified asphalt mortar [J]. Journal of silicate, 2012, 40(11): 1544 - 1552.)
- [8] 秦先涛,祝斯月,姜艺,等.水泥乳化沥青复合材料特征及其混合料性能研究[J].公路,2017(1):191-198.
(QIN Xiantao, ZHU Siyue, JIANG Yi, et al. Comparison and researches on applicability of pyrolytic slag in different brands cement [J]. Highway, 2017(1): 191 - 198.)
- [9] FU Jun, YANG Yanqing, ZHANG Xiaoqiang, et al. Different strain distributions of cement-emulsified asphalt concrete pavement between the macro and meso-scale [J]. Road materials and pavement design, 2018, 19(2): 470 - 483.
- [10] 肖葳,许翀,解文宗,等.乳化沥青冷再生混合料强度影响因素研究[J].建筑工程技术与设计,2015(6):1489.
(XIAO Wei, XU Xu, XIE Wenzong, et al. Factors affecting the strength of emulsified asphalt cold recycled mixture [J]. Building engineering technology and design, 2015 (6): 1489.)
- [11] ZENG X, XIE Y, DENG D. A study of the mixing of cement and emulsified asphalt mortar [J]. Magazine of concrete research, 2013, 65 (21): 1255 - 1264.
- [12] ZHU Shengyang, FU Qiang, CAI Chengbiao, et al. Damage evolution and dynamic response of cement asphalt mortar layer of slab track under vehicle dynamic load [J]. Science China (technological sciences), 2014, 57 (10): 1883 - 1894.
- [13] YANG Shengfeng. Simulation of rheological behavior of asphalt mixture with lattice model [J]. Journal of central south university of technology, 2008(S1): 155 - 157.
- [14] 汪洁.高浓度乳化沥青的制备及其混合料性能研究[D].西安:长安大学,2013.
(WANG Jie. Preparation of high concentration emulsified asphalt and properties of its mixture [D]. Xi'an: Chang'an University, 2013.)
- [15] 王发洲,刘云鹏,胡曙光.硅酸盐水泥与阳离子乳化沥青颗粒的相互作用机理[J].材料科学与工程学报,2013,31(2):186-190.
(WANG Fazhou, LIU Yunpeng, HU Shuguang. Interaction mechanism between Portland cement and cationic emulsified asphalt particles [J]. Journal of materials science and engineering, 2013, 31(2): 186 - 190.)
- [16] 曾晓辉,谢友均,邓德华.温度对水泥乳化沥青砂浆早期膨胀特性的影响[J].硅酸盐学报,2012,40(2):207-211.
(CENG Xiaohui, XIE Youjun, DENG Dehua. Effect of temperature on early expansion characteristics of cement emulsified asphalt mortar [J]. Journal of silicate, 2012, 40 (2): 207 - 211.)
- [17] 胡华锋,邵丕彦,李海燕.严寒地区水泥乳化沥青砂浆的低温性能及疲劳性能试验研究[J].中国铁道科学,2011,32(4):1-7.
(HU Huafeng, SHAO Piyan, LI Haiyan. Experimental study on low temperature performance and fatigue performance of cement emulsified asphalt mortar in severe cold region [J]. China railway science, 2011, 32(4): 1 - 7.)
- [18] 王浩.乳化沥青冷再生混合料路用性能研究[J].交通世界(上旬刊),2016(11):98.
(WANG Hao. Study on road performance of emulsified asphalt cold recycled mixture [J]. Traffic world (last issue), 2016(11): 98.)
- [19] 田冬梅,邓德华,田青,等.水对水泥乳化沥青砂浆动态力学性能的影响[J].硅酸盐学报,2013,41(11):1507-1513.
(TIAN Dongmei, DENG Dehua, TIAN Qing, et al. Influence of water on the dynamic mechanical properties of cement emulsified asphalt mortar [J]. Journal of silicate, 2013, 41 (11): 1507 - 1513.)
- [20] 肖晶晶,沙爱民,蒋玮,等.基于细观试验的水泥乳化沥青混合料空隙特征[J].同济大学学报(自然科学版),2013,41(9):1398-1403.
(XIAO Jingjing, SHA Aimin, JIANG Wei, et al. Gap characteristics of cement emulsified asphalt mixtures based on fine micro experiments [J]. Journal of tongji university (natural science), 2013, 41(9): 1398 - 1403.)
- [21] 杨太涯.乳化沥青冷再生旧沥青路面混合料性能研究[D].重庆:重庆交通大学,2016.
(YANG Taiya. Study on performance of cold recycling about old asphalt pavement mixture with emulsified asphalt [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2016.)
- [22] GUO C, CHENG X, ZHANG X. Research on the mechanical strength of emulsified asphalt-cement stabilized macadam based on neural network algorithm [J]. Open civil engineering journal, 2015, 9(1): 929 - 933.
- [23] 田冬梅,邓德华,彭建伟,等.温度对水泥乳化沥青砂浆层与混凝土层间界面黏结影响[J].铁道学报,2013,35(11):78-85.
(TIAN Dongmei, DENG Dehua, PENG Jianwei, et al. Effect of temperature on interfacial bonding between cement emulsified asphalt mortar layer and concrete layer [J]. Journal of railway, 2013, 35(11): 78 - 85.)