

文章编号:1007-9629(2011)06-00-000

路用半刚性基层材料抗裂缝剂应用研究

罗 辉^{1,2}, 朱宏平^{1,2}, 资建民^{1,2}, 王 英³, 鲁永发³

(1. 华中科技大学 土木工程与力学学院, 湖北 武汉 430074; 2. 华中科技大学 控制结构湖北
省重点实验室, 湖北 武汉 430074; 3. 当阳市公路段, 湖北 当阳 444100)

摘要: 将研究出的半刚性基层抗裂缝剂添加于道路基层混合料中,通过扫描电子显微镜观测材料微结构形成过程,发现其具有膨胀性和增密性.收缩试验证明,该抗裂缝剂可使道路基层结构因温度和湿度变化所引起的收缩空间大大减少.试验还分析了延迟成型时间对碎石混合料强度的影响,发现其具有缓凝性能.耐久性试验显示,掺加抗裂缝剂的半刚性基层混合料的早期强度得到了提高,养护周期缩短,耐久性也得到加强.试验路显示,利用半刚性基层材料抗裂缝剂的延时性可实施基层、面层连续施工,使基层、面层紧密结合,从而防止路面开裂,提高道路的耐久性,延长道路使用寿命.

关键词: 抗裂缝剂; 收缩; 基、面层; 连续施工

中图分类号:U414

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2011.00.000

Application Research on Anti-cracking Agent for Semi-rigid Base

LUO Hui^{1,2}, ZHU Hong-ping^{1,2}, ZI Jian-min^{1,2}, WANG Ying³, LU Yong-fa³

(1. School of Civil Engineering and Mechanics, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China;
2. Hubei Key Laboratory of Control Structure, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China;
3. Dangyang Section of Highway Administration, Dangyang 444100, China)

Abstract: The microstructure and formation process of the material mixed with anti-cracking agents were observed by the scanning electronic microscope. It was found that the anti-cracking agent has expansion character and can make the material dense. Through the shrinkage tests, it was proved that the shrink spaces of the road base, which is caused by the variations of the temperature and humidness, decrease apparently because of the anti-cracking agent. The influence of delaying the molding time on the strength of gravel mixtures was also analyzed and it was concluded that anti-cracking agent has slow setting performance. On account of adding anti-cracking agent into the semi-rigid base material, early strength of the material is enhanced, curing period is shorten and lasting quality is improved, which can be showed from the durability test. The continuous constructions of the base and asphalt pavement are feasible in the test road because of anti-cracking agent, which make the base and surface pavements compacted tightening. Thus, cracking of the pavements can be restrained, durability of the road can be improved and road life can be extended.

Key words: anti-cracking agent; shrinkage; base and asphalt pavement; continuous construction

稿日期:2010-09-07; 修订日期:2010-10-27

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50908093,51178203);国家重点基础研究发展计划资助(2011CB013800).

第一作者:罗 辉(1979—),男,湖北武汉人,华中科技大学讲师,主要从事沥青道路结构行为与破坏机理研究. E-mail:luohui66@mail.hust.edu.cn

通讯作者:资建民(1958—),女,湖南长沙人,华中科技大学教授,主要从事路基路面研究. E-mail:zjm@163.com

沥青路面的反射裂缝破坏是一个世界性的难题^[1-3]. 目前国内外对沥青路面开裂这一技术难题尚未找到较好的解决办法,多是采取加厚沥青混凝土面层,使用改性沥青和设置中间应力吸收层、基层预切缝等方法来延缓或减轻裂缝的产生^[4-6]. 这些措施虽然在一定程度上可以减轻或推迟裂缝的产生,却不能彻底解决问题,同时还会带来另外一些弊端:使用改性沥青,使工程造价大幅增加;加厚沥青混凝土面层,使沥青混凝土面层产生收缩裂缝以及使车辙的可能性增加.

随着化学肥料生产的迅速发展,湖北省磷石膏的年排放量超过 2 000 万 t,废渣的堆积将占用大量土地,污染环境,迫切需要一种绿色处理此废料的办法. 本文利用碱性结合料石灰激发磷石膏(二水硫酸钙)发生火山灰反应来制成抗裂缝剂,将其掺加于半刚性基层材料中,以提高半刚性基层材料的抗干缩和温缩性能,控制半刚性基层的开裂;同时利用该抗裂缝剂的缓凝特性,实现半刚性基层沥青路面的基、面层连续施工,加强半刚性基层沥青路面各结构层的结合力,使路基路面成为一个结合紧密的连续整体,提高路面整体抗拉强度,协调各层面的内力分布,最终达到控制沥青面层开裂的目的.

1 抗裂缝剂的抗裂机理

开发的抗裂缝剂组成(质量分数,本文所涉及的组成、掺量等均为质量分数)为:用 50%±5%的化工废料磷石膏提取的硫酸钙、50%±5%的石灰粉、0.5%的氯化钡. 制备方法为:利用碱性结合料石灰激发磷石膏(二水硫酸钙)发生火山灰反应,生成水化硅酸钙和水化铝酸钙,继续反应后生成单硫型水化铝酸钙结晶(2 种产物都具有明显的膨胀性、增强性和抗水性),即为道路基层抗裂缝剂. 将其添加于

道路基层混合料中,能使混合料具有明显的膨胀性、增密性和抗水性,从而使道路基层结构因温度和湿度变化所引起的材料收缩空间大大减少,从而达到减小道路基层开裂的目的.

通过放大 5 000 倍的扫描电镜(SEM)结果显示(见图 1),掺加 5.8%抗裂缝剂(以水泥用量为基准)的水泥稳定碎石试件比没有掺加抗裂缝剂的试件生成了更多的网状结构. 这些网状结构在材料表面、内部及空隙处穿插交错,将材料内部晶体和骨料牢牢地联接在一起,形成一个整体. 适量抗裂缝剂的加入,可以通过改变水化介质的环境来减缓硅酸钙的水化,促进铝酸钙的水化,使三硫型钙矾石(Aft)快速生成,形成凝胶状 Aft 保护膜,起到缓凝作用. 随着水化的进一步进行,这层保护膜逐渐被打破,但不影响水泥后期的水化和强度(见表 1). 后期反应以火山灰反应产物和钙矾石继续反应生成单硫型水化铝酸钙为主,钙矾石针状晶体大部分转化生成柱状单硫型水化铝酸钙结晶,晶体与凝胶相互交融而形成一个严密的不溶于水的高强度整体. 钙矾石及单硫型水化铝酸钙晶体具有显著的增密性和膨胀性,可有效减小半刚性基层材料在温度和湿度变化条件下的收缩空间,防止半刚性基层过度收缩造成的收缩开裂.

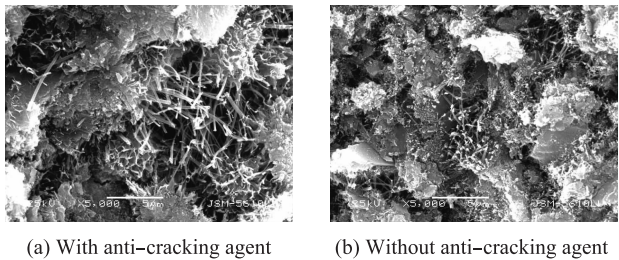


图 1 掺和未掺抗裂缝剂的水泥稳定碎石 SEM 照片
Fig. 1 SEM pattern of cement-stabilized gravel with and without anti-cracking agent

表 1 抗裂缝剂对延迟成型时间干密度及稳定粒料强度的影响对比试验

Table 1 Comparative test of influence of anti-cracking agent on delay in forming time, dry bulk density and stable aggregate strength						
Code	Anti-cracking agent addition/%	Delay time/h	Optimum water content (by mass)/%	Maximum dry density/(g·cm ⁻³)	f_{7d} /MPa	Strength loss ratio/%
1-1	0	0	5.30	2.368	4.46	0
1-2	0	1.0	5.34	2.368	4.28	4.04
1-3	0	2.5	5.38	2.360	4.27	4.26
1-4	0	4.0	5.50	2.357	3.55	20.40
1-5	0	6.0	5.80	2.355	3.20	28.30
1-6	0	9.0	6.15	2.354	2.68	39.90
1-7	6.0	0	5.50	2.368	4.53	0
1-8	6.0	1.0	5.56	2.368	4.51	0.45
1-9	6.0	2.5	5.60	2.368	4.46	1.50
1-10	6.0	4.0	5.69	2.368	4.44	2.00
1-11	6.0	6.0	5.80	2.358	4.42	2.40
1-12	6.0	9.0	6.00	2.358	4.39	3.00

Note: f_{7d} represents the unconfined compressive strength of the cement-stabilized base mixture been curing for seven days under the standard condition.

由表 1 可见,无论掺与不掺抗裂缝剂,混合料最佳含水量均随延迟成型时间的延长而增加;混合料的干密度、强度却随延迟成型时间的延长而降低.普通水泥料延迟 9 h 后,其抗压强度下降达 39%,但掺抗裂缝剂延迟 9 h 后,其抗压强度仅下降 3%.

2 抗裂缝剂掺量对半刚性基层材料性能影响试验

为满足最新提出的基、面层连续施工工艺的要求(为了保证基、面层间的相互嵌入和化学胶结,半刚性基层在铺筑后至少 8 h 内不能终凝),本文研究了不同的抗裂缝剂掺量(以水泥用量为基准)对半刚性基层材料性能的影响.

2.1 抗裂缝剂掺量对水泥凝结时间的影响

选用当阳市水泥厂 P·O42.5 水泥,抗裂缝剂的掺量分别为 0,1.5%,3.0%,4.5%,6.0%及 9.0%,测试水泥的凝结时间.结果见表 2.

表 2 抗裂缝剂掺量对水泥凝结时间的影响
Table 2 Influence of anti-cracking agent on setting time of cement

Code	Anti-cracking agent addition/%	Standard consistency/%	Setting time/h	
			Initial	Final
2-1	0	25.8	2.78	4.10
2-2	1.5	25.3	3.00	5.93
2-3	3.0	25.4	4.75	7.08
2-4	4.5	25.2	7.18	10.25
2-5	6.0	25.4	11.17	14.00
2-6	9.0	25.3	15.75	19.50

由表 2 可见,掺加抗裂缝剂可较为明显地延长水泥凝结时间.这一特点为施工由于不可抗拒的原因延迟压实提供了帮助,同时也为基、面层连续施工提供了充足的施工组织时间条件.抗裂缝剂掺量为 4.5%时即可将终凝时间延长至 10 h 左右,能满足连续施工时间需要.

2.2 抗裂缝剂掺量对稳定基层材料强度的影响

以 0,3.0%,6.0%,9.0%及 12%的掺量在水泥中加入抗裂缝剂,用于稳定级配碎石,并研究其对水泥稳定类基层材料抗压强度的影响,试件压实度 98%.结果见表 3.

由表 3 可见,(1)随着抗裂缝剂掺量的增加,水泥稳定粒料抗压强度稍有提高,然后逐渐降低,当掺量大于 6.0%时抗压强度开始明显降低.(2)抗压强度的最大值出现在抗裂缝剂掺量为 3.0%之时.

综合抗裂缝剂对水泥的缓凝作用和对基层材料抗压强度的影响,将抗裂缝剂的最佳掺量选定在水

表 3 抗裂缝剂掺量对水泥稳定类基层材料抗压强度的影响
Table 3 Influence of anti-cracking agent addition on the unconfined compressive strength of cement-stabilized base material

Code	Anti-cracking agent addition/%	Maximum dry density/%	Optimum water content(by mass)/%	f_{7d} /MPa
3-1	0	2.368	5.10	4.46
3-2	3.0	2.368	5.50	4.53
3-3	6.0	2.368	5.50	4.41
3-4	9.0	2.368	5.50	3.82
3-5	12.0	2.368	5.50	3.81

Note: f_{7d} represents the unconfined compressive strength of the cement-stabilized base mixture been curing for seven days under the standard condition.

泥用量的 4.0%~6.0%.

3 抗裂缝剂对半刚性基层材料抗裂性能的影响

收缩性能是路面设计、施工时必须考虑的一个因素,是基层抗裂性能的重要指标.对掺、不掺抗裂缝剂的半刚性基层材料分别进行干缩试验和温缩试验,来比较抗裂缝剂对半刚性基层材料收缩性能的影响.该试验中的抗裂缝剂掺量为 5.8%.由于干缩与温缩导致裂缝产生时间不同,因此干缩试验在试件成型后马上测试,温缩试验则在试件养生 90 d 后进行.干缩试验温度为 15~19℃,相对湿度 12%~18%.结果见表 4、表 5.

表 4 水泥稳定碎石干缩系数
Table 4 Dry shrinkage coefficients of cement-stabilized gravel with and without anti-cracking agent $\times 10^{-6}$

Curing time/h	Without anti-cracking agent	With anti-cracking agent
0	0	0
48	38.3	23.6
72	37.3	24.5
96	49.8	30.6
120	57.1	39.6

由表 4 可知,掺加抗裂缝剂的水泥稳定碎石的平均干缩系数比不掺抗裂缝剂试件降低 35.2%.这一方面是由于抗裂缝的掺加增加了水泥碎石料的致密性,使水泥稳定碎石的孔隙率减小,从而存在于水泥稳定碎石中的自由水减少,同时,大量晶体的生成也消耗了一部分存在于水泥稳定碎石中的水,从而使得水泥稳定碎石的失水量减小;另一方面,掺加抗裂缝剂后的水泥稳定碎石中生成了更多的晶体,凝胶生成量减少,而晶体相对于湿度变化的变形较小所致.

表 5 水泥稳定碎石的温缩系数

Table 5 Temperature shrinkage coefficient of cement-stabilized gravel with and without anti-cracking agent

×10⁻⁶

Anti-cracking agent	30~20 ℃	20~10 ℃	10~0 ℃	0~-10 ℃	10~-20 ℃	-20~-30 ℃	Average	Average (30~0 ℃)	Average (0~-30 ℃)
Without	12.06	13.45	13.32	17.53	13.78	12.9	13.84	12.94	14.74
With	8.34	8.56	10.54	13.56	11.03	9.58	10.27	9.15	11.39

由表 5 可知,掺抗裂缝剂水泥稳定碎石的温度收缩系数在 0~-10 ℃ 区间达到最大.这说明半刚性基层在寒冷的冬天易发生温度收缩裂缝,采用以 0~-10 ℃ 区间的温缩系数评价材料温缩性能的合理性.同时可以发现,通过掺抗裂缝剂能明显改善水泥稳定碎石的温度收缩性能.掺抗裂缝剂试件的温缩系数比普通试件降低了 25.8%.

半刚性材料是由固相(组成其空间骨架的原材料颗粒和其间的胶结物)、液相(存在于固相表面与空隙中的水和水溶液)、气相(存在于空隙中的气体)组成,所以半刚性材料的外观胀缩性是三相的温度收缩性的综合效应结果.其中,气相的影响可以忽略.故半刚性基层材料的胀缩可主要从固相、液相胀缩两方面进行分析.固相中的新生胶结物具有较大的温度胀缩性;而液相(水)的胀缩性则是毛细孔和

凝胶孔中的水通过存在于半刚性材料内部的较大孔隙,经过扩张作用、毛细管张力作用和冰冻作用三个作用过程而实现的.水有相当大的热胀缩系数,比固相部分大 4 倍~7 倍^[7].抗裂缝剂的掺加,增加了水泥稳定碎石的致密性,降低了存在于水泥稳定碎石空隙中的水含量,从而减小了最影响材料温缩性能的“液相”作用,同时,晶体生成更多,凝胶体生成更少,也部分减小了固相的热胀缩性.

4 掺抗裂缝剂水泥稳定碎石混合料的长期强度与耐久性研究

掺抗裂缝剂水泥稳定碎石混合料的长期抗压、抗拉(劈裂)强度测试结果见表 6、表 7,试验中的抗裂缝剂掺量为 6.0%.

表 6 水泥稳定基层材料的长期强度

Table 6 Long-term compressive strength of cement stabilized base material

Code	Aggregate type	m(cement):m(aggregate)	Anti-cracking agent	Unconfined compressive strength/MPa			
				7 d	28 d	90 d	180 d
4-1	Stone chips gravel	5:95	Without	4.48	5.28	5.93	6.33
4-2	Stone chips gravel	5:95	With	4.52	5.56	6.12	6.41
4-3	Grit	5:95	Without	3.38	4.35	5.26	5.31
4-4	Grit	5:95	With	3.20	4.67	5.37	5.48

表 7 抗裂缝剂水泥稳定碎石长期劈裂强度

Table 7 Long-term splitting strength of cement stabilized gravel

Anti-cracking agent	Splitting strength/MPa			
	7 d	28 d	90 d	180 d
Without	0.45	0.65	0.86	0.95
With	0.46	0.76	1.11	1.20

由表 6、7 可以看出,掺抗裂缝剂的半刚性基层混合料的早期、长期强度均得到了提高.

掺抗裂缝剂二灰碎石混合料耐久性能指标测试结果见表 8.

由表 8 可见,在本次试验范围内掺抗裂缝剂二灰碎石混合料收缩值比普通混合料小 40%左右;干湿循环 20 次掺抗裂缝剂二灰碎石混合料的抗压强度不仅没有减小,反而增加了 44.9%;水中浸泡 30 d 后其抗压强度有较大程度增加;抗冻性、抗硫酸盐侵

表 8 掺与不掺抗裂缝剂二灰稳定碎石混合料耐久性能对比

Table 8 Durable performance comparison of lime-fly ash crushed stone mixture mixed with or without anti-cracking agent

Test project	With anti-cracking agent	Without anti-cracking agent
Shrinkage×10 ⁴	3.71	6.42
Wet and dry circle(20 times) strength loss ratio/%	-44.9	2.3
Water resistance(30 d) strength loss ratio/%	-17.1	1.9
Sulfate corrosion resistance coefficient	1.18	1.04
Frost resistance(7 cycles)	0.98	0.60
Frozen stability coefficient		

蚀性均比没有掺加抗裂缝剂的同样配合比的水泥碎石混合料增强.因此,采用抗裂缝剂改性半刚性基层混合料的耐久性能也能得到提高.

5 试验路及检测分析

试验路汉宜路 K245+500—K251+500 路面结构为:AC-10 沥青混凝土(2 cm)+AC-16 中粒式沥青混凝土(4.5 cm)+5.5%水泥稳定碎石(28~30 cm)+老路面(拉毛处理).抗裂缝剂的掺量为 5.8%.利用抗裂缝剂的缓凝增密特性,采用基、面层连续施工工艺,即上、下基层一次铺筑成型,取消透层,在基层终凝前连续铺筑沥青面层.

5.1 基层强度

铺筑 1.5 d 后,对试验路钻芯试件的检测表明,基层的抗压强度达 2.5 MPa 以上,相当于常温养生 7 d 的强度,达到了开放交通的要求.所以,掺抗裂缝剂后实施基、面层连续施工工艺铺筑的沥青路面可取消养生期.因为上铺的沥青层热量可加速基层强度发展,故施工完毕当天即可开放交通.

表 9 试验路早期钻芯取样强度

Table 9 Early strength of drilling core samples of test road

Pile No.	Average strength/MPa
K250+850_+780	4.30
K250+780_+690	2.94
K250+440_+410	2.55
K250+470_+440	2.62
K250+490_+470	3.65

5.2 基、面层间粘结强度

对用不同施工工艺铺筑的半刚性基层沥青路面钻芯检测,在以常规方法施工的路段钻取芯样时基、面层脱落,不能得到完整的芯样试件,而且面层底有明显光滑界面.采用基、面层连续施工技术铺筑的路段,钻取芯样完好,而且基、面层相互嵌入,没有明显的界面,基、面层是一个整体,很难将其拉脱,见图

表 11 连续施工工艺施工试验路面路用性能检测

Table 11 Road performance detection for testing roads

Testing road	Pile No.	Width/m	Flatness/mm	Deflection value/0.01 mm	Friction coefficient	Crack number per km	Paving time
Paved by the continuous construction technique	Hanyi road K250-K251	12	2	22	46	1	2006
	Liangjiang road K18-K19	9	3	36	47	1	2006
	Liangjiang road K18-K19	9	3	38	48	3	2007
Paved by conventional technique	Hanyi Road K250-K251	9	8	38	40	96	2006
	Liangjiang Road K18-K19	9	4	56	42	120	2006
	Liangjiang Road K18-K19	9	9	54	43	25	2007

由表 11 可见,用水泥稳定碎石作基层的对比路段上,基、面层连续快速施工方法铺筑的路面,每 km 平均仅有 2~3 条横向裂缝,且缝较窄,缝宽一般都

2.对采用基、面层连续施工技术铺筑路段的芯样进行层间抗剪强度检测,结果见表 10.由表 10 可见,此时基、面层间的黏结强度高于 0.43 MPa.



图 2 芯样表明基、面层联接紧密
Fig. 2 Drilled sample shows that the pavement and base bond tightly with each other

表 10 采用连续施工技术铺筑的沥青路面芯样基、面层间的黏结强度

Table 10 Bond strength between the base and surface layer of asphalt core sample

Code	Diameter/mm	Critical load/kN	Shear strength/MPa	Average shear strength/MPa
5-1	43.8	0.65	0.43	0.52
5-2	48.7	0.65	0.43	
5-3	43.7	0.64	0.43	
5-4	35.7	0.80	0.79	

5.3 裂缝对比

对采用常规施工工艺和基、面层连续施工工艺铺筑的路面开裂状况进行对比检测(见表 11,12),检测时间为道路铺筑后大约 3 年.按基、面层连续施工工艺铺筑的半刚性基层沥青路面,其横向裂缝率为 1~4 条/km.采用常规工艺铺装的相同结构的半刚性基层路面(同一公路不同路段,交通量一致),其横向裂缝率为 50~115 条/km.这说明基、面层连续施工工艺可显著降低半刚性基层的横向裂缝,其横向裂缝率只有常规施工工艺的 3%~8%.

为 0.2~0.7 mm,主要是因温度引起的裂缝.而在常规方法施工的路段上,平均每 km 横向裂缝多达 25~120 条,裂缝较宽,一般都在 0.8 mm 左右,且多

贯通全断面,主要是因基层干缩引起的裂缝和基层分层铺筑结合不好造成的整体强度差所引起的荷载裂缝. 另外,因试验路各结构层连续施工而使其整体强度较高,所以抗弯沉程度也普遍高于常规施工路段 30%以上.

6 结 论

(1)掺该抗裂缝剂能明显改善水泥稳定碎石的干缩和温缩性能,其中干缩系数降低 35.2%,温缩系数降低 25.8%;

(2)掺该抗裂缝剂的水泥稳定碎石的耐久性能也得到很大提高;

(3)该抗裂缝剂对水泥具有缓凝特性,可实现半刚性基层沥青路面的基、面层连续施工;

(4)对试验路进行基、面层连续施工,路基、路面黏结良好,裂缝率只有常规施工路段的 3%~8%,同时裂缝宽度较小,证明了抗裂缝剂以及相结合的基、面层连续施工工艺在防治半刚性基层沥青路面反射裂缝上的有效性和适用性.

参考文献:

[1] THOMAS B,ALI M. Field and laboratory evaluation of a reflective crack interlayer in New Jersey[J]. Transportation Research Record,2008(2084):114-123.
[2] 黄志义,王金昌,朱向荣. 动荷载下含反射裂缝沥青路面结构黏

弹性分析[J]. 浙江大学学报:工学版,2007,41(1):114-119.
HUANG Zhi-yi, WANG Jin-chang, ZHU Xiang-rong. Viscoelastic analysis of asphalt pavement with reflective cracks and subjected to dynamic loading[J]. Journal of Zhejiang University:Engineering Science,2007,41(1):114-119. (in Chinese)
[3] OWUSU-ANTWI E B, KHAZANOVICH L, TITUS-GLOVER L. Mechanistic-based model for predicting reflective cracking in asphalt concrete-overlaid pavements[J]. Transportation Research Record,1998(1629):234-241.
[4] 苗英豪,赵恩强,王书云,等. 土工织物延缓沥青路面疲劳型反射裂缝的有限元分析[J]. 北京工业大学学报,2009,35(6):790-795.
MIAO Ying-hao, ZHAO En-qiang, WANG Shu-yun, et al. FEM analysis of mitigating fatigue-induced reflective cracking in asphalt pavements using geotextiles[J]. Journal of Beijing University of Technology,2009,35(6):790-795. (in Chinese)
[5] AGLAN H, OTHMAN A, FIGUEROA L. Processing conditions-fracture toughness relationships of asphalt concrete mixtures [J]. Journal of Materials Science, 1994, 29 (18): 4786-4792.
[6] REN Rui-bo, LI Hi-wen, WANG Zhe-ren. Analysis of semi-rigid asphalt pavement with flexible base as a sandwich layer[J]. Geotechnical Special Publication,2009(193):155-162.
[7] 胡少伟,沈捷,李清富,等. 半刚性基层沥青路面开裂机理分析与防治措施[J]. 华东公路,2008(3):48-50.
HU Shao-wei, SHEN Jie, LI qing-fu, et al. Cracking mechanism and prevention measures for semi-rigid base-course asphalt pavements[J]. East China Highway, 2008(3):48-50. (in Chinese)