

基于快速养护技术的水稳基层力学性能试验研究

贾彦丽, 施钧

(河南交通职业技术学院, 河南 郑州 450006)

摘要: 为研究快速养护技术对水泥稳定基层路用力学性能的影响, 通过无侧限抗压强度试验、抗压回弹模量试验及抗裂性能试验, 分析了养护剂、养护龄期等因素对其力学性能和抗裂性能的影响。结果表明, 快速养护技术能有效改善水泥稳定基层的力学性能、抗裂性能和稳定性能, 提高无侧限抗压强度和抗压回弹模量, 降低干缩系数和温缩系数; 养护剂对早期强度的影响较显著, 对后期刚度的增强更为有利, 且无侧限抗压强度值和抗压回弹模量之间存在良好的线性关系; 高温型(Ⅲ型)养护剂对其力学性能的改善效果最佳, 低温型(Ⅱ型)养护剂次之, 普通型(Ⅰ型)养护剂的影响程度最小; 干缩系数随养护龄期的延长呈现线性增加趋势, 温缩系数随环境温度的降低呈现线性下降趋势, 且 3 种养护剂对干缩和温缩指标的改善效果不一致。

关键词: 公路; 水泥稳定碎石基层; 快速养护技术; 力学性能; 抗裂性能

中图分类号: U418.5

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2017)01-0136-05

水泥稳定碎石材料由于其强度高、稳定性好及工艺简单等优点而被广泛应用于高速公路、一级公路的基层、底基层。但随着交通量和行车轴载的不断增加, 对道路结构性能及质量的要求越来越高, 水稳碎石基层的抗裂、早期强度不足及现场施工工期等问题逐渐显现, 其引发的各种病害(裂缝、路面结构刚度不足等)已被道路工程界所重视。

中国地域广阔, 所处地理环境较为复杂, 高寒、低温区域占国土面积的 30%, 恶劣的地理环境不仅增加了道路施工难度, 亦提高了道路结构、材料的技术要求, 稍有疏忽将促使路面出现系列病害, 甚至大幅降低道路的服役寿命。目前, 针对水稳材料病害问题开展了系列研究, 主要集中在水稳材料抗裂性能、高寒区域抗冻性能等方面, 而针对水稳碎石基层的快速养护技术鲜有研究。该文结合特殊环境下水稳基层的早强、抗冻、快速施工等因素, 利用自主研发的高温型、低温型和普通型养护早强材料, 通过力学性能试验和抗裂性能试验分析养护早强剂对水泥稳定基层力学性能和抗裂性能的影响, 为快速养护早强剂在道路工程中的深入应用提供技术支持。

(河南贾峪生产), 细集料细度模数为 2.7、含水率为 2.2%, 粗集料为 5~25 mm 连续级配碎石, 其各项指标均满足规范要求。外加剂为上海麦斯特建材有限公司生产的萘系高效减水剂。养护早强剂为自行研发, 根据使用环境温度分为普通型(Ⅰ型)、低温型(Ⅱ型)和高温型(Ⅲ型), 适用范围分别为 20~30、0~10、30~40 ℃, 其主要成分见表 2。

表 1 水泥的基本性能

性能指标	指标值	
标准稠度用水量/%	24.1	
初凝时间/min	157	
终凝时间/min	218	
比表面积/(kg·m ⁻²)	387	
安定性	合格	
抗折强度/MPa	3 d	58
	28 d	67
抗压强度/MPa	3 d	33.1
	28 d	50.7

表 2 养护剂的主要成分

成分	含量/%	成分	含量/%
SiO ₂	8~15	CaO	35~45
Fe ₂ O ₃	6~10	MgO	0~5
Al ₂ O ₃	13~18	SO ₃	10~15

1 试验方案

1.1 原材料

选择双龙水泥集团生产的 P.O42.5 普通硅酸盐水泥, 其基本技术性能见表 1。碎石集料为石灰岩

1.2 试验方案

(1) 级配设计。采用骨架—嵌挤型级配进行水泥稳定碎石级配设计,级配曲线见图 1。依据 JTGE51—2009《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》中的重型击实方法确定最佳含水量(5.4%)和最佳干密度(2.352 g/cm^3),按照 98% 压实度控制标准,水泥掺量拟定为 4%,减水剂用量为 1% 水泥用量,养护早强剂掺量为 8% 水泥用量。

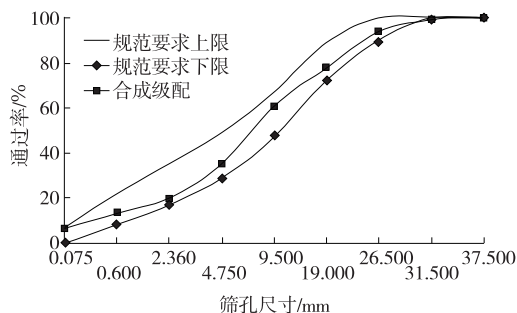


图 1 水泥稳定碎石级配曲线

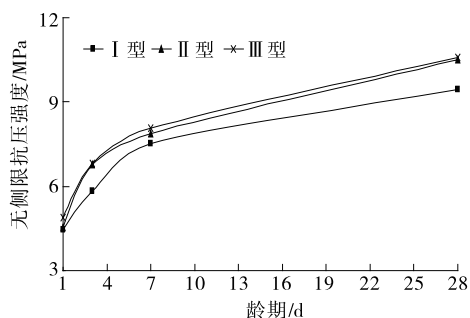
(2) 试验方法。为了降低集料不均匀对水泥稳定材料特性的影响,对集料进行逐档筛分,按照级配设计要求进行骨架—嵌挤型配制。利用无侧限抗压强度试验、抗压回弹模量试验及抗裂性试验分析不同类型养护早强剂的性能,进而对其进行优选。上述试验均按照 JTGE51—2009 的要求进行,其中无侧限抗压强度和抗压回弹模量试验依据确定的最大干密度和最佳含水量,以 98% 压实度标准静压成型 $\phi 150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ 圆柱试件;抗裂性能通过温缩试验和干缩试验进行分析,采用 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$ 梁式试件。

2 力学性能分析

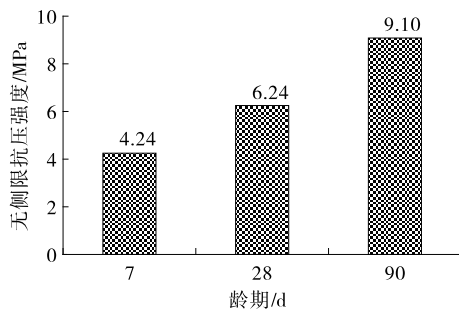
2.1 无侧限抗压强度分析

按照上述方法成型试件,并将试件在温度 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ 、相对湿度 95% 的条件下养护,结合实际施工周期情况,对未掺加养护剂的试件进行 7、28 和 90 d 龄期养护,对掺加普通型(I 型)、低温型(II 型)和高温型(III 型)养护剂的试件分别进行 12 h、1、3、7 和 28 d 龄期养护。按照规范要求无侧限抗压强度测试,结果见图 2。

由图 2 可知:1) 快速养护对水泥稳定基层的力学强度具有显著影响,大幅提高了抗压强度,尤其对早期强度改善更显著。掺加 I 型养护剂的试件,在 12 h、1 d 后的强度分别为 3.67 和 4.25 MPa,与未掺



(a) 掺加养护剂



(b) 未掺加养护剂

图 2 水稳基层无侧限抗压强度随养护龄期的变化

加养护剂试件的 7 d 强度相比,12 h 后强度达到 7 d 的 91%,1 d 后强度达到 106%。说明养护早强剂能有效提升水泥稳定碎石的无侧限抗压强度。这是因为养护剂中的活性成分加速了水泥结合料水化结晶的形成,提高了水化产物凝结速率,进一步增强了水泥稳定碎石材料的早期强度。2) 由于不同类型养护剂所含活性成分的差异,其应用环境、改善效果不尽相同,高温型(III 型)对水泥稳定碎石材料强度的影响最大,低温型(II 型)次之,普通型(I 型)的影响最小。与未掺加养护剂试件的 7 d 强度相比,掺加养护剂 I 型、II 型和 III 型试件的 1、3 d 强度分别提高 5.9% 和 40%、8% 和 63%、17.9% 和 65.8%,掺加养护剂试件的 1 d 强度均超过未掺加养护剂试件的 7 d 强度,尤其是掺加高温型养护剂的试件,12 h 后的强度即超过未掺加养护剂试件的 7 d 强度,7 d 强度已超过未掺加养护剂试件的 28 d 强度。3) 养护龄期对无侧限抗压强度存在较大影响,强度随着龄期的增加而增加;养护剂对养护龄期更敏感,即早期养护时间对强度影响更显著。无侧限抗压强度与龄期之间服从对数函数关系,二者相关系数高于 0.9 (见表 3),说明可通过早期养护龄期内强度(0~7 d)预测 90 d 强度,判定强度是否满足要求。且掺加养护剂试件的强度与龄期拟合曲线较为一致,其拟合公式系数值相近,与未掺加养护剂试件存在显著差

异,从侧面反映出快速养护技术对材料力学性能的改善效果。4) 掺加养护剂试件的强度变异系数低于普通试件(见图3),说明养护剂在提高水泥稳定碎石材料力学强度性能的同时,降低了骨料因不均匀离析因素造成的局部缺陷。另外,随养护龄期的增加,变异系数逐渐降低,说明养护后期材料强度的发展占主导作用,对其力学强度性能的影响更为显著。其中普通型(I型)养护剂试件的力学稳定性能优于高温型(Ⅲ型)和低温型(Ⅱ型)。这是由于普通型(I型)养护剂受环境影响较少,能发挥最佳改善效果,而低温型(Ⅱ型)尽管改善了试件的力学稳定性能,但受低温恶劣环境条件的影响,并不能完全避免或消除对水稳基层力学性能的影响。

表3 水稳基层无侧限抗压强度与养护龄期的关系

养护剂类型	拟合公式	相关系数
未掺加	$R_t = 1.890 \ln t + 0.364 \ 5$	$R^2 = 0.977 \ 8$
I型	$R_t = 1.434 \ 9 \ln t + 4.582 \ 3$	$R^2 = 0.990 \ 3$
Ⅱ型	$R_t = 1.793 \ 4 \ln t + 4.539 \ 2$	$R^2 = 0.997 \ 1$
Ⅲ型	$R_t = 1.584 \ 3 \ln t + 5.132 \ 4$	$R^2 = 0.992 \ 2$

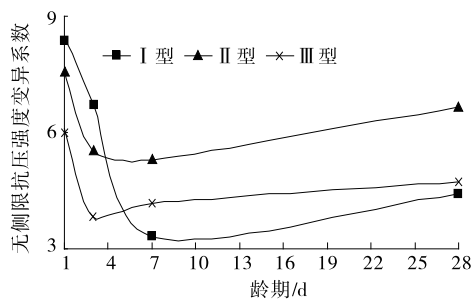


图3 水稳基层无侧限抗压强度变异系数与养护龄期的关系

养护早强剂能有效提高材料的早期力学强度,这是因为养护剂加速了与水泥材料的水化过程,短期内生成一定数量的钙矾石、水化铝酸钙等,快速填充材料内部孔隙,随着养护龄期的延长,水化产物持续增加,不断填充内部孔隙,促使材料结构进一步密实、早期强度快速提高。

2.2 抗压回弹模量分析

抗压回弹模量指标反映水稳材料在行车荷载作用下变形的敏感程度。通过抗压回弹模量试验,分析不同龄期(1、3、7、28 d)、不同养护剂类型对水稳材料刚度的影响程度,试验结果见图4。

由图4可知:1) 养护剂对抗压回弹模量具有优良的改善作用,能显著提高水稳材料的刚度,尤其对

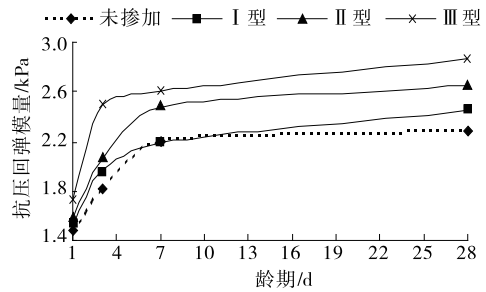


图4 水稳基层抗压回弹模量随养护龄期的变化

于早期性能,养护剂对水稳材料抗压回弹模量的影响更为显著。这是由于养护剂中活性成分加速水泥水化结晶,填充内部孔隙,提高了材料结构性能,随着养护期的延长,其水化程度进一步提高,结构强度也随之提高。高温型(Ⅲ型)养护剂对抗压回弹模量的提高幅度最大,低温型(Ⅱ)次之,普通型(I型)最小。7 d龄期下I型、Ⅱ型和Ⅲ型养护剂对抗压回弹模量的改善幅度分别为21.6%、14.9%、26.3%,28 d龄期下分别为8.5%、15.3%和22.4%。不同类型养护剂对养护龄期的敏感性不同,这主要与养护剂不同活性成分含量有关,应针对水稳材料使用环境合理选择养护剂类型。2) 抗压回弹模量与养护龄期服从对数函数关系(见表4),二者相关系数高于0.85,说明养护龄期对抗压回弹模量的增强具有重要作用。对于运用快速养护技术的水稳基层,可采用表4所示拟合公式对90 d抗压回弹模量进行预估,为实体工程应用提供理论依据。3) 掺加养护剂试件的抗压回弹模量变异系数远低于未掺加养护剂的试件(见图5),掺加养护早强剂改善了材料的内部结构,提高了材料力学稳定性能。高温型(Ⅲ型)和普通型(I型)养护剂试件的变异系数较小,力学稳定性最佳,低温型(Ⅱ)次之。28 d龄期的回弹模量变异系数均小于5%,即随养护龄期的延长,回弹模量变异系数呈现下降趋势,尤其是掺加养护剂的试件,说明养护期延长有助于提高水稳碎石的稳定性。掺加高温型(Ⅲ型)养护剂后,水稳碎石的28 d抗压回弹模量变异系数比1 d时降低120.4%。

表4 水稳基层抗压回弹模量与养护龄期的关系

养护剂类型	拟合公式	相关系数
未掺加	$E_t = 0.259 \ 7 \ln T + 1.509 \ 5$	$R^2 = 0.890 \ 8$
I型	$E_t = 0.283 \ 2 \ln T + 1.580 \ 5$	$R^2 = 0.961 \ 2$
Ⅱ型	$E_t = 0.328 \ 6 \ln T + 1.661 \ 6$	$R^2 = 0.928 \ 1$
Ⅲ型	$E_t = 0.322 \ 9 \ln T + 1.905 \ 3$	$R^2 = 0.853 \ 5$

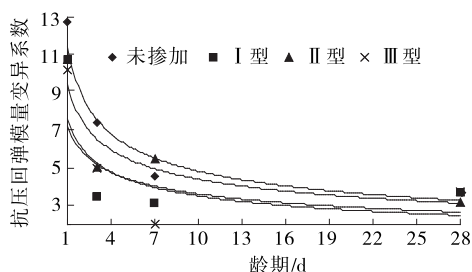


图5 水稳基层抗回弹模量变异系数与养护龄期的关系

2.3 抗压回弹模量与无侧限抗压强度的关系

规范要求水泥稳定基层采用 90 d 养护龄期的抗压回弹模量作为设计指标,但在实际施工中一般采用 7 d 无侧限抗压强度作为质量是否合格的主要参考指标。如何保证在抗压强度满足要求的条件下抗压回弹模量指标同样满足设计要求,目前关于这方面的研究涉及较少,且工程人员几乎忽视了该问题的存在,认为 7 d 强度合格,则抗压回弹模量也能满足设计要求。而规范中并没有显示或确定这两个指标的关系。为此,下面通过分析掺加不同类型快速养护剂时无侧限抗压强度与抗压回弹模量之间的关系,建立二者之间的关系模型,结果见图 6。

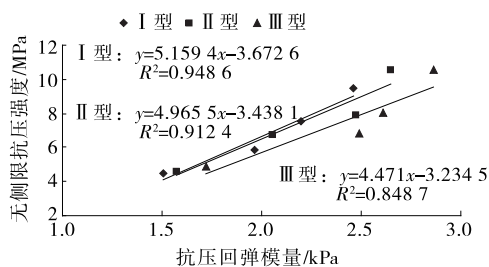


图6 水稳基层抗压回弹模量与无侧限抗压强度的关系

文献[8]指出水泥稳定材料的抗压回弹模量与无侧限抗压强度存在密切联系,由于两种试验方法在荷载作用方式、速率等方面存在差异,试件破坏的变形过程及破坏模式不尽相同。如抗压回弹模量主要发生在弹性变形阶段,无侧限抗压强度则在塑性变形阶段破坏。由图 6 可知:抗压回弹模量与无侧限抗压强度之间存在着良好的线性关系,相关系数达 0.84 以上,即强度增加,抗压回弹模量也增加。反映出养护龄期对二者具有相同的影响,可通过图 6 所示线性拟合公式描述水泥稳定基层抗压回弹模量与无侧限抗压强度指标在相同养护龄期下的关系。

3 抗裂性能分析

通过干缩、温缩试验分析快速养护技术下水稳

基层材料的抗裂性能,进一步评价水稳基层快速养护技术的有效性。采用静压法室内成型 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 400\text{ mm}$ 梁式试件。干缩试验的养护温度为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、湿度为 50% ,利用电阻应变仪进行测试,同时记录试件含水率的变化;温缩试验的养护龄期为 28 d,环境箱温度为 $30 \sim -30\text{ }^{\circ}\text{C}$,温度间隔 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。试验结果见图 7~9。

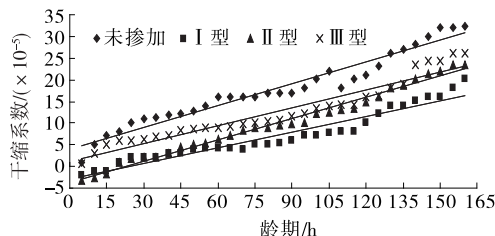


图7 水稳基层干缩系数随养护龄期的变化

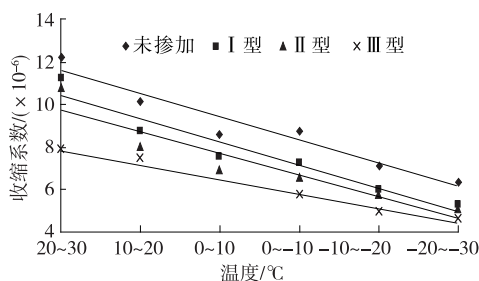


图8 水稳基层收缩系数随温度的变化

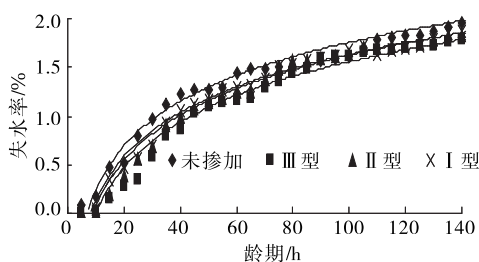


图9 水稳基层失水率随养护龄期的变化

由图 7~9 可知:1) 养护剂对水稳材料的干缩和温缩性能均存在显著影响。未掺加养护剂试件的干缩系数值最大,高温型(III型)养护剂试件的干缩系数值次之,普通型(I型)的最小。与未掺加养护剂试件相比,I型、II型和III型养护剂试件的 7 d 干缩系数分别降低 37.9% 、 27.4% 、 19.2% 。干缩系数随着养护龄期的延长呈现线性增长趋势。温缩系数随着温度的降低呈线性下降趋势,无论在高温范围还是低温范围,掺加养护剂的水稳材料的温缩系数均低于未掺加的试件,I型、II型和III型养护剂试件的温缩系数分别降低 31.3% 、 35.6% 和 45.4% 。掺加养护剂的水稳材料的干缩系数和温缩系数均降低,

说明利用早强养护技术能改善水稳材料的抗裂性能。2) 高温型(Ⅲ型)养护剂对温缩性能的改善效果最佳,其次为低温型(Ⅱ型),普通型(Ⅰ型)的改善效果一般。且3种养护剂均具有一定的温度敏感性,低温环境下养护剂对水稳材料温缩性能的改善效果优于高温环境下,Ⅰ型、Ⅱ型和Ⅲ型养护剂在高温环境($0\sim 30\text{ }^{\circ}\text{C}$)下的温缩系数分别降低10.6%、15.7和31.2%,而在低温环境($0\sim -30\text{ }^{\circ}\text{C}$)下分别降低44.7%、48.1和53.9%。说明养护早强剂对水稳碎石材料的低温抗裂性能具有优良的改善作用,尤其适用于低温环境条件下的养生。3) 水泥稳定材料失水率随养护时间的延长而显著增加,且在养护初期($0\sim 60\text{ h}$)的损失幅度较大,随后失水率变化幅度逐渐降低。养护剂改善了水稳材料内部结构的保水状态,能进一步降低结构孔隙内部水分的散失,这与干缩系数随养护时间的变化规律相对应。

图10为不同类型养护剂试件的失水率与干缩系数之间的关系。从中可见:干缩系数随失水率的增加而增加,这是因为水稳材料在养护过程中暴露于空气中,材料含有的自由水、毛细孔水、吸附水及层间水等不断蒸发减少而造成干燥收缩,与已有文献结论一致。干缩系数指标对失水率变化的敏感性更为显著,4种试件干缩系数值的区辨性高于试件随养护龄期的变化,说明利用失水率指标更能精确地评价水稳材料的干缩效果。干缩系数值随失水率的变化规律为未掺加养护剂试件>Ⅲ型养护剂试件>Ⅱ型养护剂试件>Ⅰ型养护剂试件,与上述分析结果一致。

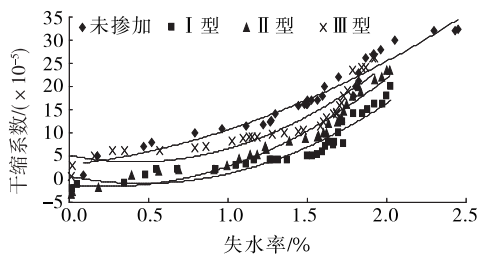


图10 水稳基层失水率与干缩系数的关系

4 结论

(1) 快速养护技术可改善水稳碎石基层的力学性能,提高其无侧限抗压强度和抗压回弹模量,尤其对于 $0\sim 7\text{ d}$ 龄期强度的提高明显,养护后期强度提高幅度趋于缓和。能进一步提高水稳碎石材料的力学稳定性能,降低骨料因不均匀离析造成的局部缺

陷。随养护龄期的延长,养护剂对抗压回弹模量的影响愈为显著。高温型(Ⅲ型)养护剂的力学性能改善效果最佳,低温型(Ⅱ型)次之,普通型(Ⅰ型)的影响程度最小。

(2) 抗压回弹模量、无侧限抗压强度均随养护龄期的延长而增加,均与养护龄期存在良好的对数函数关系。对于掺加养护剂的试件,可利用拟合对数函数公式预测不同龄期下的无侧限抗压强度和抗压回弹模量。同时抗压回弹模量与无侧限抗压强度之间存在一定的线性关系,相关系数高于0.84,采用拟合公式能描述二者在相同养护龄期下的关系。

(3) 养护剂能有效提高水稳碎石基层的抗干缩和温缩性能,显著降低干缩系数和温缩系数值。干缩系数随养护龄期的延长呈线性增加趋势,温缩系数随环境温度的降低呈线性下降趋势。3种养护剂对干缩和温缩指标的改善效果不一致,干缩系数的改善效果为高温型(Ⅲ型)>低温型(Ⅱ型)>普通型(Ⅰ型);对于温缩系数,高温型(Ⅲ型)的改善效果最佳,其次为低温型(Ⅱ型)和普通型(Ⅰ型)。

参考文献:

- [1] 张玉芝,杜彦良,孙宝臣,等.季节性冻土地区高速铁路路基冻融变形规律研究[J].岩石力学与工程学报,2014,33(12).
- [2] 林骋,王金昌,胡蓉.考虑水稳碎石性能劣化的沥青路面变形[J].浙江大学学报:工学版,2014,48(12).
- [3] 王艳,倪富健,李再新.水泥稳定碎石基层收缩性能影响因素试验研究[J].公路交通科技,2007,24(10).
- [4] JTGE51-2009,公路工程无机结合料稳定材料试验规程[S].
- [5] 段龙梅.季冻区稳定粒料类基层材料抗冻性能及温缩性能试验研究[D].长春:吉林大学,2006.
- [6] 熊锐,杨晓凯,房建宏,等.高寒地区超早强水泥稳定碎石力学性能试验研究[J].材料导报,2015,11(增刊2).
- [7] 曾梦澜,罗迪,吴超凡.不同级配类型水泥稳定碎石路面基层材料的抗裂性能[J].湖南大学学报:自然科学版,2013,40(10).
- [8] 李振霞,陈渊召.不同类型半刚性基层材料性能的试验与分析[J].长安大学学报:自然科学版,2012,32(1).
- [9] 路光辉.纤维半刚性材料用于道路基层的试验研究[J].路基工程,2010(1).
- [10] 沙爱民,胡力群.半刚性基层材料抗冲刷性能试验方法研究[J].中国公路学报,2002,15(2).

收稿日期:2016-07-01