

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2012.05.005

柔性玄武岩纤维水泥混凝土配比优化设计

史国刚^{1,2}, 李海涛¹, 顾兴宇¹

(1. 东南大学 交通学院, 江苏 南京 210096; 2. 江苏省交通运输厅工程质量监督局, 江苏 南京 210001)

摘要: 为研究玄武岩纤维增强水泥混凝土的路用性能, 针对柔性纤维水泥混凝土配合比设计过程中的不确定性和依赖经验的现状, 以水灰比作为参照因素, 通过正交试验分析了玄武岩纤维体积掺量和长度对混凝土抗弯拉强度的影响程度, 明确了主次影响参数及参数适宜取值范围。通过进一步分析纤维体积率对水泥混凝土 28 d 抗弯拉强度、干缩率和冲击韧性等指标的影响, 结合柔性纤维混凝土的增强机理, 确定了各参数的最佳选值。研究结果表明, 水灰比、纤维体积掺量和纤维长度是影响混凝土强度的重要因素, 0.2% ~ 0.3% 体积掺量的玄武岩纤维可显著提高水泥混凝土的早期强度、收缩性能和抗冲击性能, 同时具有良好的工作性, 玄武岩纤维对水泥混凝土后期强度的提升有一定效果。

关键词: 道路工程; 柔性纤维水泥混凝土; 正交分析; 玄武岩纤维; 配比优化

中图分类号: U416.216.02

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268(2012)05-0024-06

Mix Proportion Optimal Design for Flexible Basalt Fiber Reinforced Cement Concrete

SHI Guogang^{1,2}, LI Haitao¹, GU Xingyu¹

(1. School of Transportation, Southeast University, Nanjing Jiangsu 210096, China;

2. Construction Engineering Quality Supervision Bureau of Jiangsu Provincial Department of Transport, Nanjing Jiangsu 210001, China)

Abstract: In order to research the road performances of basalt fiber reinforced concrete, aimed at the uncertainty and experience relying in flexible fiber cement concrete mix design, taken water/binder ratio as a reference factor, the influences of basalt fiber volume content and length on the bending tensile strength of cement concrete were analyzed by orthogonal experiments, and the rank and the value scope of the influencing factors were determined. The optimized values of the influencing factors were selected by further research the influences of basalt fiber volume fraction on 28 d bending strength, dry shrinking ratio and impact toughness of cement concrete and the strengthening mechanism analysis of flexible fiber reinforced concrete. The research results indicate that (1) water-cement ratio, fiber volume content and fiber length are important factors influencing concrete strength; (2) adding 0.2% - 0.3% volume content of basalt fiber can significantly enhance the early strength, shrink properties and impact properties of cement concrete which remain good workability. Basalt fiber has some effects on improving the late strength of reinforced concrete.

Key words: road engineering; flexible fiber cement concrete; orthogonal analysis; basalt fiber; mix proportion optimization

0 引言

纤维混凝土是高性能混凝土 (HPC) 21 世纪研究的一个主要方向, 它是由通过 2 种不同性质的材

料 (纤维与水泥混凝土) 复掺制备而成的, 目的在于整合纤维和混凝土性能优势达到整体最优。纤维混凝土有许多特殊的优点, 如强度高、耐冲击、抗冻融等性能, 尤其是对混凝土脆性特征的改善方面,

收稿日期: 2011-11-29

作者简介: 史国刚 (1975-), 男, 江苏常州人, 高级工程师. (sgg_zjz@jgcd.gov.cn)

具有重大意义。

目前,纤维混凝土已经成功应用于高层建筑物、水下构筑物、公路机场道面及高速轨道等领域^[1]。柔性纤维水泥混凝土,即在水泥混凝土材料中掺入一定比例的柔性纤维,目的在于弥补混凝土材料的脆性大、抗拉能力弱的不足。由于柔性纤维的掺量显著低于普通混凝土拌和物各组分,常用体积率为0.1%~2.0%(外掺法),对骨架结构影响小,能保证混凝土密度性。尽管纤维掺量小,其通过与微观浆体的机械作用,可控制裂纹的衍生与发展,改善局部受力条件^[2],同时也影响着混凝土的拌和质量。

目前柔性纤维对水泥混凝土的影响机制还未有从定量上进行科学论述,以致纤维混凝土的生产配合比设计往往依赖于经验,缺乏合理的依据。此外,随着外加剂、活性掺和料的利用,混凝土条件也渐趋复杂化,给设计工作增加了不少难度,一定程度上限制了纤维混凝土的推广应用。基于纤维增强理论^[3-4],本研究通过正交试验分析及多性能指标考核,结合新型玄武岩纤维混凝土的配合比设计过程,阐述了柔性纤维混凝土配合比的一种设计方法。

1 试验原材料及成型方法

1.1 试验原材料

采用连续级配的5~25 mm粒径石灰岩碎石、南京青龙牌P.O.42.5R水泥、细度模数3.2的天然河沙、萘系高效减水剂和饮用自来水;使用的玄武岩纤维来自浙江东阳石金玄武岩纤维公司,其主要性能指标见表1。

表1 玄武岩纤维的主要性能指标

Tab.1 Main performance indexes of basalt fiber

纤维名称	密度/ (g·cm ⁻³)	抗拉强 度/MPa	弹性模 量/GPa	纤维直 径/μm	纤维长 度/mm	断裂延 伸率/%
玄武岩纤维	2.70	4 150~ 4 800	93~ 110	17	12、18、24	3.1

1.2 试件成型

空白混凝土试件按照《公路工程水泥及水泥混凝土试验规程》(JTG E30—2005) T 0551进行制作,纤维混凝土试件的制作采用干拌法,如图1所示。

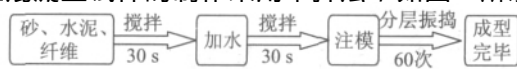


图1 干拌法纤维混凝土试件成型

Fig.1 Forming of fiber reinforced concrete specimen using dry-mix method

2 正交试验设计与分析

2.1 正交试验设计

正交试验设计是研究多因素多水平的一种设计方法,通过对多因素有代表性的水平进行正交试验与方差分析,研究各因素对试验指标的影响显著程度,实现了高效、经济的试验设计目标^[5]。由纤维增强理论分析,纤维参数可选择为体积率及长径比^[6],另将水灰比作为参照,使试验具备可比性,各因素选取有代表性的各水平值。试验方案采用3×3的3因素3水平正交表,并增加空白混凝土组,对比纤维混凝土性能,详见表2。混凝土材料的设计指标一般为强度,混凝土7 d与28 d强度具有相关性,为缩短试验周期,正交试验指标采用7 d抗弯拉强度。抗弯拉强度测试(如图2所示)按照《公路工程水泥及水泥混凝土试验规程》(JTG E30—2005) T 0558水泥混凝土抗弯拉强度试验方法进行,每组3根100 mm×100 mm×400 mm小梁试件。强度取其平均值,另增加考核混凝土坍落度,使配比符合材料工作性要求。

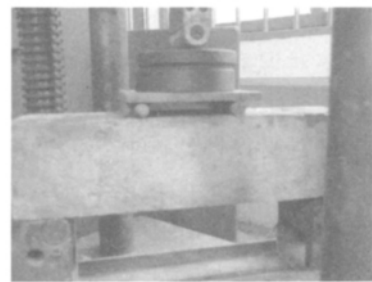


图2 混凝土抗弯拉强度测试

Fig.2 Bending strength test of concrete

2.2 正交试验结果与分析

表2 正交试验方案及结果

Tab.2 Orthogonal test scheme and result

组别	各因素水平组合			塌落度/ mm	7 d 抗弯拉 强度/MPa
	水灰比	纤维体 积率/%	纤维长度/mm		
1	0.39	—	—	100	4.09
2	0.37	0.10	12	20	4.99
3	0.37	0.30	18	0	5.29
4	0.37	0.50	24	0	4.51
5	0.39	0.10	18	25	5.14
6	0.39	0.30	24	10	4.93
7	0.39	0.50	12	0	4.66
8	0.41	0.10	24	10	4.11
9	0.41	0.30	12	5	4.68
10	0.41	0.50	18	0	4.29

注: 1. 组1为空白混凝土;

2. 长径比因素中,直径不变,则长度为变量。

与空白混凝土对比看出,纤维显著提高了材料的早期强度,最高可提高29.3%。但从各组纤维试件的破坏形态来看,由于掺量较低,纤维对混凝土的脆性破坏改善作用有限,断裂面自下而上发展迅速,断裂截面上的纤维被拔出,表明纤维径向抗拉强度要大于其与浆体界面的结合力,纤维还未能完全发挥效用。为了比较各因素对玄武岩纤维混凝土抗弯拉强度的影响显著性,计算各正交分析指标,如表3所示。

表3 极差、方差分析

Tab. 3 Range and variance analysis

方差来源	极差	平方和	自由度	均方值
水灰比	0.57	0.21	2	0.10
纤维体积率/%	0.48	0.12	2	0.06
纤维长度/mm	0.39	0.06	2	0.03

由表3极差与方差计算结果表明,对混凝土7 d抗弯拉强度的影响因素由强到弱分别为:水灰比>纤维体积率>纤维长径比(单丝长度与直径的比值)。可见,水灰比仍是混凝土强度的主要影响因素,配合比设计时仍需严格加以控制。与长径比相比,纤维体积率对混凝土性能的影响更大,可判定为主要因素,长径比可判定为次要因素。

对混凝土材料工作性影响显著程度从正交表试验结果易对比得出:纤维体积率>水灰比>纤维长径比。因此,配比设计工作中,须严格限制纤维用量,用量过大,不但使材料干稠难以施工,而且引入大量有害空隙,对材料性能往往产生负面影响,如图3所示。

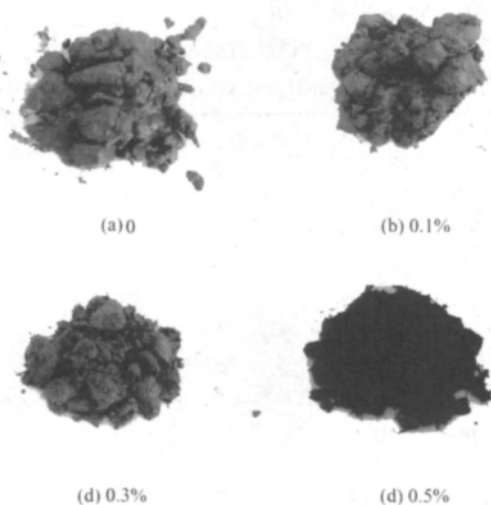


图3 不同纤维体积率混凝土

Fig. 3 Reinforced concrete with different fiber volume fractions

2.3 确定主要因素的取值范围

正交试验设计不仅可确定各因素对试验指标的影响显著性,对于混凝土配比设计,还可确定各纤维参数的适宜数值或范围,如图4所示。

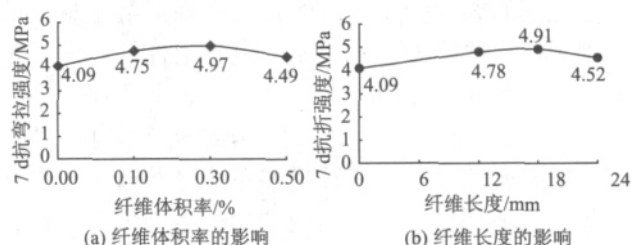


图4 纤维体积率、纤维长度对混凝土抗弯拉强度的影响

Fig. 4 Influences of fiber volume fraction and fiber length on bending strength of cement concrete

由图4可以看出,分别掺入体积率为0.10%、0.30%和0.50%的玄武岩纤维后,混凝土抗弯拉强度显著提高。体积率为0.30%时,达到峰值,随着体积率超过0.30%,混凝土拌和质量下降,直接表现是强度出现负增长。纤维长径比由正交分析确定为次要因素,长度变化对混凝土抗折强度作用差异性的影响不显著。18 mm长玄武岩纤维混凝土性能为最佳,原因在于该长径比下,纤维体系之间负干扰作用小,对混凝土骨架结构起到了较强的固定作用。综上所述,玄武岩纤维混凝土适宜的体积率为0.10%~0.30%,长度宜选择18 mm。

3 纤维参数的优化选择

正交试验尽管有完善的数学理论分析手段,影响试验指标的显著性往往同时依赖于因素选定的水平差值,降低了试验分析的客观性,尤其是在没有确定因素对试验指标作用机制的情况下。此外,纤维复合水泥基材料的性能也不仅仅包括强度要求。李为民等、朱华军等分别试验验证了玄武岩纤维对混凝土冲击韧性与耐久性的提高作用^[7-9],这些性能更能体现纤维材料应用于水泥基材料中的实际价值。针对玄武岩纤维主要因素,考核干缩率、抗冲击韧性及28 d抗弯拉强度(水泥混凝土路面材料的配合比设计指标)3个指标^[10],确定其最佳体积率,保证配比设计的复合材料性能整体均衡最高。

3.1 混凝土配合比与纤维参数选择

素混凝土试配强度按重交通等级设计弯拉强度标准值5.0 MPa为基准,并参考正交试验结果调整为如下,见表4。

表 4 调整配合比 (单位: kg/m^3)

Tab. 4 Adjusted mix proportion (unit: kg/m^3)

水	水泥	砂	石子	减水剂
150	375	752	1 175	7.5

注: 3 种体积率纤维混凝土的塌落度分别为 50、40 mm 和 25 mm。

作为相对次要因素, 根据正交试验结果分析 18 mm 长玄武岩纤维性能表现较优越, 确定该长径比为最终选择; 由正交分析结果可知适宜的纤维体积率在 0.10% ~ 0.30%, 而不同体积率的影响变异性与水灰比相当, 因此选择 3 种体积率, 0.10%、0.20% 和 0.30%, 进行上述试验指标的研究。

3.2 指标试验

3.2.1 试验方法

设计指标为 28 d 抗弯拉强度的测试方法与正交试验相同, 试件标准养护龄期为 28 d; 干缩试验按照《公路工程水泥及水泥混凝土试验规程》(JTG E30—2005) T 0566 水泥混凝土干缩性试验方法进行; 冲击韧性试验借鉴美国混凝土学会 ACI-544 推荐的落锤冲击试验方法, 如图 5。材料冲击韧性的评价采用式 (1):

$$W = nmgh, \quad (1)$$

式中, W 为冲击能量; n 为冲击次数; m 为落锤质量; g 为重力加速度; h 为落锤下落高度。

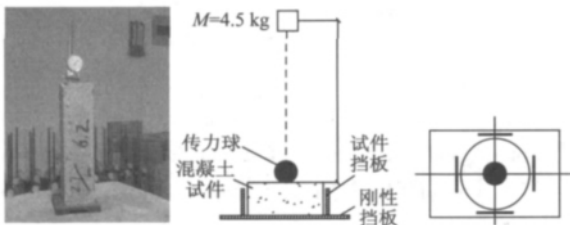


图 5 干缩试验与冲击韧性试验示意图

Fig. 5 Dry shrinkage test and impact toughness test

3.2.2 结果与讨论

如图 6 所示的试验结果表明: 玄武岩纤维对混凝土 28 d 抗弯拉强度的幅度影响有限, 当掺量为 0.30% 时反而低于空白混凝土的强度水平, 这是受到纤维单丝的分散状况及后期空隙率增加影响的结果, 与纤维的早期增强效果类似, 当纤维体积率大于某一特定值, 纤维增强作用转为削弱作用。玄武岩纤维能有效降低混凝土材料的早期干缩, 而混凝土硬化后期这种抑制作用的强度并未增加, 相比于空白混凝土, 体积率为 0.10%、0.20% 和 0.30% 的纤维混凝土的 28 d 干缩率分别降低了 4.45%、5.03% 和 7.82%。

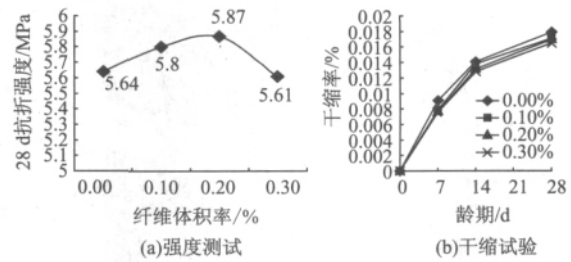


图 6 干缩试验与强度测试结果

Fig. 6 Results of dry shrinkage test and strength test

表 5 落锤式冲击试验结果

Tab. 5 Result of falling hammer impact test

纤维体积率/%	初裂冲击次数	终裂冲击次数	初裂、终裂冲击次数差	全过程试件破坏冲击能量/J	初裂后试件破坏冲击能量/J
0.00	53	58	5	1 179	102
0.10	75	98	23	1 992	466
0.20	131	163	32	3 314	651
0.30	158	215	57	4 371	1 159

表 5 为落锤式冲击试验结果, 从中可知: 玄武岩纤维显著增加了材料的抗冲击性能, 尤其是试件初裂后仍使其保持整体性, 继续抵抗冲击荷载; 掺入体积率为 0.10% 玄武岩纤维混凝土抵抗冲击能力提高 70%, 效果显著; 随着纤维体积率的增加, 材料抵抗冲击作用而不发生破坏的能力也持续提高。

3.3 柔性纤维增强机理与纤维参数的确定

刚性纤维 (如钢纤维) 因其尺寸大, 并可加工成异形加强与混凝土基体的机械锚固作用, 对控制宏观裂缝的扩展有重要意义, 纤维桥接作用可显著提高基体抗拉强度。而柔性纤维单丝尺寸小, 直径从几微米到几十微米, 受力完全依赖于基体界面的粘结强度, 且新拌混凝土材料中柔性纤维分散往往处于松弛状态, 待裂缝两端扩展到一定宽度时, 开始受拉^[11-12]。玄武岩纤维能显著提高混凝土早期抗弯拉强度, 而对后期强度的提升及水泥混凝土干缩的抑制作用有限。可推断, 柔性纤维的增强机理在于提高混凝土材料的拌和质量及其硬化收缩阶段的抗裂能力, 局部改善裂缝区受力的均匀性, 提高整体性^[5-7]。柔性纤维掺量低, 主要受制于其在混凝土材料中的分散状况, 按照复合材料理论, 纤维混凝土承载力的提升颇为有限, 被试验结果证实, 但无法解释柔性纤维增强材料的冲击韧性大幅度提高的事实。柔性纤维混凝土的微观结构见图 7。

柔性纤维直径小, 数量庞大, 直接对混凝土微观结构作用, 由于纤维单丝的分散, 在混凝土新拌

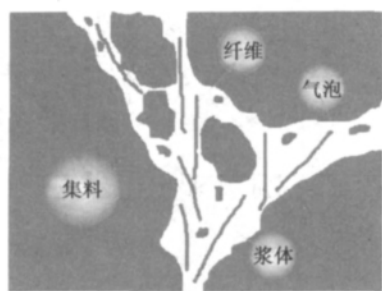


图7 柔性纤维混凝土微观结构

Fig. 7 Microstructure of flexible fiber reinforced concrete

成型时,一定程度上影响了水泥石结构气、固、液三相分散,尤其是气相。空间纤维体系降低了新拌混凝土泌水作用的同时,也限制了振捣过程中气体的排出,因此纤维复合水泥基材料的空隙率略有增加。尽管气体的排出受到限制,由于柔性纤维单丝的阻拦,气泡不断分离,形态趋于细化,水分子表面张力逐渐显现作用,气泡形态趋于圆润,有助于降低混凝土硬化后形成缺陷的概率及气泡区应力集中程度。另一方面,混凝土材料的极限拉应力变小,只有 10^{-3} 数量级,降低气泡尺寸,对提高脆性材料的冲击韧性是意义非凡的。在极小应变条件下,弹性气泡体增加了对冲击应力波的耗散作用,使纤维复合水泥基材料抵抗冲击破坏的能力倍增。

因此,柔性纤维对混凝土材料耐久性能提高意义巨大,若要体现纤维这一低掺量外掺料的价值,在材料配合比设计应考虑纤维的增强作用。由试验结果知,随着掺量的增加,纤维对混凝土的冲击韧性是成倍的提高,对干缩作用的抑制也是逐渐增强的,而对抗弯拉强度的增长是先增后减,0.20%体积率达到峰值,提高幅度较空白混凝土约5%。另外也有研究表明,在充分保证分散性及耐碱性的前提下,纤维对混凝土材料抵抗冻融作用、渗透作用等耐久性能都有不同程度的提高。另一方面,材料经济性也是项目投资方及设计者一直以来考虑的重点问题,纤维掺量尽管低,但是其单价比混凝土这一廉价材料昂贵。混凝土试验拌和时,0.10%~0.30%体积率均能保证纤维的分散状况良好,因此推荐将0.20%~0.30%纤维体积率作为设计施工配合比,其中0.20%体积率为较经济型配合比,0.30%为高性能型配合比。

3.4 主因素影响显著性收敛验证

对于离散型试验数据,样本标准差可由式(2)计算:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad (2)$$

计算0.2%差值与0.1%差值纤维体积率试件弯拉强度的样本标准差为0.196 > 0.110 MPa,是收敛的,证明优化过程是有效的。

4 结论

(1) 通过配合比试验验证了软纤维对水泥基材料的增强作用,对混凝土抗弯拉、抗冲击及抑制收缩均有一定的改善作用。玄武岩纤维能显著提高混凝土材料的早期强度,但对后期强度的发展及形成贡献幅度有限。

(2) 室内正交试验明确了影响柔性纤维增强混凝土性能的几种主要参数,其中水灰比和玄武岩纤维体积率对纤维增强水泥混凝土的性能有重要影响,纤维的长径比对其有一定影响。

(3) 通过对各因素采用多水平多指标,综合评价纤维增强水泥混凝土的性能,建议添加0.2%~0.3%体积掺量的玄武岩纤维,其不仅可显著提高水泥混凝土的早期强度、收缩性能和抗冲击性能,同时也具有良好的工作性。

参考文献:

References:

- [1] 陈润锋,张国防,顾国芳. 我国合成纤维混凝土研究与应用现状[J]. 建筑材料学报, 2001, 4(2): 167-173.
CHEN Runfeng, ZHANG Guofang, GU Guofang. State of Study and Application of Synthetic Fibers Reinforced Concrete in China [J]. Journal of Building Materials, 2001, 4(2): 167-173.
- [2] 董振英. 纤维混凝土微观机理及应用研究[D]. 北京: 清华大学, 2003.
DONG Zhenying. Meso-mechanism of Fiber Reinforced Concrete and Its Application [D]. Beijing: Tsinghua University, 2003.
- [3] 黄贻凤,杨成忠,莫振龙. 聚丙烯纤维路用混凝土配合比设计试验研究[J]. 混凝土, 2008(4): 117-119.
HUANG Yifeng, YANG Chengzhong, MO Zhenlong. Experimental Study on the Mix Ratio of Durafiber Reinforced Pavement Concrete [J]. Concrete, 2008(4): 117-119.
- [4] 孙家瑛,魏涛,王学文. 聚丙烯纤维对混凝土路用性能的影响[J]. 混凝土, 2001(6): 57-59.
SUN Jiaying, WEI Tao, WANG Xuewen. Influence of

- Polypropylene Fibermesh on the Properties of Road Concrete Materials [J]. Concrete, 2001 (6): 57-59.
- [5] 中国现场统计研究会三次设计组. 正交法和三次设计 [M]. 北京: 科学出版社, 1985.
- Group for Triple Design of Chinese Association for Applied Statistics. Orthogonal Experiment and Triple Design [M]. Beijing: Science Press, 1985.
- [6] GHANBARPOUR S, MAZAHARIPOUR H, MIRMORADI S H, et al. The Effect Type and Volume Fraction (VF) of Steel Fiber on the Mechanical Properties of Self-compacting Concrete [J]. Journal of Engineering, Design and Technology, 2010, 8 (3): 247-256.
- [7] 朱华军. 玄武岩纤维混凝土耐久性能试验研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2009.
- ZHU Huajun. Experimental Study on Durability of Basalt Fiber Reinforced Concrete [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2009.
- [8] 李为民, 许金余. 玄武岩纤维对混凝土的增强和增韧效应 [J]. 硅酸盐学报, 2008, 36 (4): 476-486.
- LI Weiming, XU Jinyu. Strengthening and Toughening in Basalt Fiber-reinforced Concrete [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2008, 36 (4): 476-486.
- [9] 廉杰, 杨勇新, 杨萌, 等. 短切玄武岩纤维增强混凝土力学性能的试验研究 [J]. 工业建筑, 2007, 37 (6): 8-10.
- LIAN Jie, YANG Yongxin, YANG Meng, et al. Experimental Research on the Mechanical Behavior of Chopped Basalt Fiber Reinforced Concrete [J]. Industrial Construction, 2007, 37 (6): 8-10.
- [10] ALY T K, SANJAYAN J G, COLLINS F. Effect of Polypropylene Fibers on Shrinkage and Cracking of Concretes [J]. Materials and Structures, 2008, 41 (10): 1741-1753.
- [11] 董振英, 李庆斌. 纤维增强脆性复合材料细观力学若干进展 [J]. 力学进展, 2001, 31 (4): 555-582.
- DONG Zhenying, LI Qingbing. Some Developments on Meso-mechanics of Fiber-reinforced Quasi-brittle Composites [J]. Advances in Mechanics, 2001, 31 (4): 555-582.
- [12] 郑晓霞, 郑锡涛, 缙林虎. 多尺度方法在复合材料力学分析中的研究进展 [J]. 力学进展, 2010, 40 (1): 41-56.
- ZHENG Xiaoxia, ZHENG Xitao, GOU Linhu. The Research Progress on Multiscale Method for the Mechanical Analysis of Composites [J]. Advances in Mechanics, 2010, 40 (1): 41-56.

(上接第18页)

- [8] 马新, 郭忠印. 动载作用下沥青路面的剪切破坏机理 [J]. 中国公路学报, 2009, 22 (6): 34-39.
- MA Xin, GUO Zhongyin. Shear Destruction Mechanism of Asphalt Pavement under Moving Load [J]. China Journal of Highway and Transport, 2009, 22 (6): 34-39.
- [9] 曾峰. 沥青路面预防性养护决策方法的研究与技术应用 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
- ZENG Feng. Study on Asphalt Pavement Preventive Maintenance Decision Method and Application of Its Technology [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009.
- [10] 马庆伟. 基于层位功能考虑的耐久型沥青路面结构研究 [D]. 西安: 长安大学, 2010.
- MA Qingwei. Study on the Durable Asphalt Pavement Structure Based on Layer Function [D]. Xi'an: Chang'an University, 2010.

(上接第23页)

- ZHUANG Chuanyi, WANG Lin, SHEN Aiqin, et al. Prediction Model of Surface Temperature of Asphalt Pavement [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2010, 27 (3): 39-48.
- [8] 吴晟, 吴兑, 邓雪娇, 等. 南岭山地高速公路路面温度变化特征分析 [J]. 气象科技, 2006, 34 (6): 783-787.
- WU Sheng, WU Dui, DENG Xuejiao, et al. Characteristics of Road Surface Temperature on Freeway over Nanling Hilly Region [J]. Meteorological Science and Technology, 2006, 34 (6): 783-787.
- [9] 杨文娟, 顾海荣, 单永体. 路面温度对城市热岛的影响 [J]. 公路交通科技, 2008, 25 (3): 147-152.
- YNAG Wenjuan, GU Hairong, SHAN Yongti. Influence of Pavement Temperature on Urban Heat Island [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2008, 25 (3): 147-152.
- [10] CHAPMAN L, THORNES J E, BRADLEY A V. Modelling of Road Surface Temperature from a Geographical Parameter Database. Part 2: Numerical [J]. Meteorological Applications, 2001, 8 (4): 421-436.
- [11] JACOBS W, RAATZ W E. Forecasting Road Surface Temperatures for Different Site Characteristics [J]. Meteorological Applications, 1996, 3 (3): 243-256.