

掺玄武岩纤维水泥稳定再生碎石基层性能研究

薛振华^{1,2}, 关博文³, 樊兴华¹

(1. 陕西省高性能混凝土工程实验室, 陕西 渭南 714000; 2. 陕西铁路工程职业技术学院; 3. 长安大学)

摘要:针对不同的建筑垃圾掺量,通过抗压强度试验、抗弯拉强度试验、干缩性能试验、抗冲刷性能试验、抗冻性试验、抗疲劳性能试验,研究掺加玄武岩纤维对水泥稳定建筑垃圾路用性能的影响。试验结果表明:掺加纤维后,水泥稳定建筑垃圾的28 d抗压强度、28 d抗弯拉强度增大,干缩系数降低,28 d冲刷质量损失率降低,冻稳系数增大、90 d疲劳寿命提高;随着建筑垃圾掺量的增大,水泥稳定建筑垃圾的路用性能逐渐降低。建筑垃圾掺量为100%时,掺纤维水泥稳定建筑垃圾的28 d抗压强度、28 d抗弯拉强度分别比不掺纤维的水泥稳定建筑垃圾增大了10.1%、17.1%,28 d干缩系数降低了19.4%,冲刷损失率降低了14.6%,冻稳系数增大了2.4%,疲劳寿命增大了26.7%(应力比为0.6)、12.6%(应力比为0.7)。建筑垃圾掺量小于等于75%、纤维掺量为0.06%时,水泥稳定建筑垃圾可应用于重交通荷载等级下高速公路基层中。

关键词: 道路工程; 水泥稳定建筑垃圾; 路用性能; 玄武岩纤维

将建筑垃圾应用于水泥稳定碎石基层中,不但能降低对天然石料资源的耗费,还可以减少建筑垃圾对环境的污染,具有良好的经济社会效益。肖杰研究表明:建筑垃圾吸水率大、压碎值高,随着建筑垃圾掺量的增大,水泥稳定建筑垃圾的抗压强度逐渐降低;文华、周新锋等研究表明:建筑垃圾中砖块含量越大,再生水稳碎石的强度越低,但仍能满足现行规范对基层路用性能的应用要求。研究现状表明:建筑垃圾物理力学性能较差,进而限制了建筑垃圾在高等级公路基层中的应用,也限制了建筑垃圾的掺量。

李明杰研究表明:目前主要采用改善水稳碎石级配,减少水泥剂量,掺加乳化沥青,掺加纤维,掺加橡胶粉等方法来改善水稳碎石的抗裂性能;焦双健、李淑等采用玄武岩纤维改善水稳碎石的路用性能,并对纤维长度、纤维掺量对水稳碎石路用性能的影响作了线性回归分析,发现玄武岩纤维对水稳碎石的路用性能有较强的改善作用。研究现状表明:在水泥稳定建筑垃圾中掺加玄武岩纤维可以较为经济、强效地改善其路用性能。

目前,建筑垃圾多用于二级及以下道路的基层或高速公路、一级公路底基层中,对建筑垃圾在高速公路

基层中的应用研究还较少,建筑垃圾的掺量也较低。为了提高水泥稳定建筑垃圾的路用性能,增大建筑垃圾的掺量,使其可以应用于高速公路的基层中,该文通过7 d抗压强度试验优选玄武岩纤维的较佳掺量和长度,并通过抗压强度试验、抗弯拉强度试验、干缩性能试验、抗冲刷性能试验、抗冻性试验、抗疲劳性能试验,研究掺加纤维对不同建筑垃圾掺量水泥稳定建筑垃圾路用性能的影响,为增大建筑垃圾的掺量,提高水泥稳定建筑垃圾基层的使用寿命,推广水泥稳定建筑垃圾在高等级公路基层中的广泛应用提供技术支撑。

1 原材料及试验方案

1.1 原材料

水泥为42.5级普通硅酸盐水泥,建筑垃圾来源于陕西,其物理力学性能测试结果如表1所示。

建筑垃圾的组成比例如表2所示,建筑垃圾的外观形貌如图1所示。

通过X射线荧光分析仪分析建筑垃圾中混凝土和砖块的化学组成,结果如表3所示。

混凝土和砖块的化学组成均以硅、铝、钙、铁元素

收稿日期:2021-01-04

基金项目:陕西省渭南市2018年度科研项目重点研发计划项目(编号:ZDYF-JCYJ-92_zsg);2020年陕铁院中青年科技创新人才计划项目(编号:KJRC202007)

作者简介:薛振华,男,硕士,副教授。E-mail:327224731@qq.com

| 表 1 建筑垃圾的物理力学性能指标测试结果 | | | |
|--|-----------|-------------|-----------|
| 表观密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$) | 吸水率/ % | 针片状含量/ % | 压碎值/ % |
| 2.57 | 12.8 | 13.9 | 39.5 |

| 表 2 建筑垃圾的组成比例 | | | | % |
|---------------|------|------|-----|---|
| 混凝土 | 砖块 | 砂浆 | 杂质 | |
| 69.4 | 19.6 | 10.1 | 0.9 | |



图 1 建筑垃圾外观形貌

| 表 3 混凝土和砖块的化学组成 | | | | | | | | | % |
|-----------------|-------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|------------------|-------------------|-----------------|------------|
| 试样 | CaO | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | MgO | K ₂ O | Na ₂ O | SO ₃ | 极限氧气指数 LOI |
| 混凝土 | 19.82 | 45.04 | 10.36 | 3.06 | 1.05 | 3.02 | 1.96 | 0.50 | 13.3 |
| 砖块 | 14.15 | 49.31 | 8.29 | 2.31 | 1.42 | 2.51 | 1.44 | 0.37 | 9.9 |

为主,镁、钾、钠和硫的含量较少,混凝土中的钙含量比砖块高,铝含量低。

建筑垃圾混合料中细集料含量较高,在进行级配设计时要将建筑垃圾重新筛分后再调整级配,碎石和建筑垃圾的设计级配如表 4 所示。

玄武岩纤维技术指标如表 5 所示。

| 项目 | 通过下列筛孔(mm)的质量百分率/% | | | | | | |
|------|--------------------|------|------|------|------|------|-------|
| | 31.5 | 19 | 9.5 | 4.75 | 2.36 | 0.6 | 0.075 |
| 碎石 | 100 | 79.2 | 48.2 | 29.9 | 19.7 | 11.2 | 1.6 |
| 建筑垃圾 | 100 | 77.3 | 50.1 | 28.6 | 20.9 | 11.8 | 1.7 |
| 级配上限 | — | 86 | 58 | 32 | 28 | 15 | 3 |
| 级配下限 | — | 68 | 38 | 22 | 16 | 8 | 0 |

| 表 5 玄武岩纤维的技术指标 | | | |
|--|--------------|-------------|--------------|
| 密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$) | 弹性模量/ GPa | 断裂延伸率/ % | 抗拉强度/ MPa |
| 2.61 | 110 | 3.3 | 3 400 |

维掺量为 0.03%、0.06%、0.09%、0.12%,纤维长度为 9、18、27 mm,进行击实试验,并通过 7 d 抗压强度试验优选出较佳的纤维掺量和长度。水泥稳定建筑垃圾的 7 d 抗压强度试验结果如表 6 所示。

1.2 试验方案

以 7 d 抗压强度为指标,进行水泥稳定建筑垃圾的配合比设计,以优选出玄武岩纤维的较佳掺量和长度,并通过水泥稳定建筑垃圾的力学性能试验(28 d 抗压强度、90 d 抗弯拉强度)、干缩抗裂性能试验、耐久性能试验(抗冲刷性能、抗冻性能、抗疲劳性能),研究玄武岩纤维对水泥稳定建筑垃圾路用性能的影响。试验方法均参考 JTG E51—2009《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》。

2 水泥稳定建筑垃圾混合料组成设计

2.1 玄武岩纤维参数的选取

取建筑垃圾掺量为 100%,水泥剂量为 4.5%,纤

| 表 6 水泥稳定建筑垃圾 7 d 抗压强度试验结果 | | | |
|---------------------------|------------------------------------|------|------|
| 纤维掺量/ % | 不同纤维长度(mm)时水泥稳定 建筑垃圾 7 d 强度/MPa | | |
| | 9 | 18 | 27 |
| 0.03 | 5.14 | 5.51 | 5.08 |
| 0.06 | 5.45 | 5.83 | 5.35 |
| 0.19 | 4.98 | 5.42 | 4.98 |
| 0.12 | 4.93 | 5.26 | 4.74 |

由表 6 可知:随着纤维长度的增大,水泥稳定建筑垃圾的 7 d 抗压强度先增大后减小,当纤维长度为 18 mm 时,水泥稳定建筑垃圾的 7 d 抗压强度最大。纤维长度较短时,纤维对不同的水泥水化产物不能充分地包裹连接,对水稳碎石的整体强度影响较小;纤维长度较大时,纤维的数量也变少,且较长的纤维难以拌和

均匀,导致强度下降。随着纤维掺量的增大,水泥稳定建筑垃圾的掺量先增大后减小,纤维掺量为 0.06% 时,水泥稳定建筑垃圾的抗压强度最大。纤维掺量过小时,纤维无法在水稳碎石内部形成整体的乱向分布体系,无法起到连接固定的作用;纤维掺量过大时,纤维易结团、散布不均匀,且阻碍了水泥石的相互黏结,导致水稳碎石强度下降。

2.2 7 d 抗压强度试验

基于以上研究,取水泥剂量为 4.5%,纤维长度为 18 mm,纤维掺量为 0、0.06%,建筑垃圾掺量为 0、25%、50%、75%、100%,进行水泥稳定建筑垃圾的击实试验和 7 d 抗压强度试验。结果如表 7、8 所示。

表 7 水泥稳定建筑垃圾的击实试验结果

| 纤维掺量/ % | 建筑垃圾 掺量/% | 最佳含水率/ % | 最大干密度/ (g·cm ⁻³) |
|------------|--------------|-------------|---------------------------------|
| 0 | 0 | 4.9 | 2.36 |
| | 25 | 6.1 | 2.25 |
| | 50 | 7.6 | 2.13 |
| | 75 | 8.9 | 2.02 |
| | 100 | 10.3 | 1.94 |
| 0.06 | 0 | 5.0 | 2.37 |
| | 25 | 6.1 | 2.25 |
| | 50 | 7.7 | 2.13 |
| | 75 | 8.9 | 2.03 |
| | 100 | 10.3 | 1.94 |

由表 7 可知:建筑垃圾掺量越高,水泥稳定建筑垃圾的最佳含水率越大,最大干密度随之减小。掺加玄武岩纤维对水泥稳定建筑垃圾的最佳含水率、最大干密度影响很小,在成型试件时,可以忽略纤维对最佳含水率的影响。

表 8 水泥稳定建筑垃圾 7 d 抗压强度

| 纤维掺 量/% | 不同建筑垃圾掺量(%)时水泥稳定 建筑垃圾 7 d 抗压强度/MPa | | | | |
|------------|---------------------------------------|------|------|------|------|
| | 0 | 25 | 50 | 75 | 100 |
| 0 | 6.27 | 5.96 | 5.75 | 5.43 | 5.16 |
| 0.06 | 6.93 | 6.5 | 6.22 | 6.08 | 5.78 |

由表 8 可知:随着建筑垃圾掺量的增大,水泥稳定建筑垃圾的抗压强度逐渐减小。建筑垃圾掺量为 100% 时,水泥稳定建筑垃圾的 7 d 抗压强度均不能满足重交通荷载等级下高速公路铺筑上层结构的要求。掺加玄武岩纤维后,水泥稳定建筑垃圾的 7 d 抗压强度大幅度增加,建筑垃圾掺量为 100% 时,掺纤维水泥

稳定建筑垃圾的 7 d 抗压强度较不参加纤维的水泥稳定建筑垃圾增大了 12%。

抗压强度配合比设计指标取 6 MPa,即水泥稳定建筑垃圾的 7 d 抗压强度大于 6 MPa 时,认为水泥稳定建筑垃圾能够满足重交通荷载等级下高速公路铺筑上层结构的要求。

基于以上研究,该文选取建筑垃圾掺量为 0、25%、50%、75%、100%,水泥剂量为 4.5%,纤维长度为 18 mm,纤维掺量为 0、0.06%,进行水泥稳定建筑垃圾的路用性能试验,以研究掺加纤维对不同建筑垃圾掺量水泥稳定建筑垃圾路用性能的影响。

3 路用性能试验

3.1 力学性能试验

根据 JTG E51—2009《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》成型试件,进行 28 d 抗压强度试验、90 d 抗弯拉强度试验,试验结果如表 9 所示。

表 9 水泥稳定建筑垃圾的力学性能及
干缩抗裂性能试验结果

| 纤维掺 量/% | 建筑垃圾 掺量/% | 28 d 抗压 强度/MPa | 90 d 抗弯拉 强度/MPa | 28 d 干缩系数/ (×10 ⁻⁶ %) |
|------------|--------------|-------------------|--------------------|-------------------------------------|
| 0 | 0 | 8.04 | 1.39 | 73.251 |
| | 25 | 7.70 | 1.32 | 79.455 |
| | 50 | 7.41 | 1.2 | 84.218 |
| | 75 | 7.08 | 1.11 | 92.222 |
| | 100 | 6.71 | 1.05 | 99.710 |
| 0.06 | 0 | 8.84 | 1.68 | 57.527 |
| | 25 | 8.41 | 1.59 | 63.984 |
| | 50 | 8.21 | 1.44 | 68.384 |
| | 75 | 7.76 | 1.32 | 75.326 |
| | 100 | 7.39 | 1.23 | 80.394 |

由表 9 可知:随着建筑垃圾掺量的增大,水泥稳定建筑垃圾的 28 d 抗压强度、90 d 抗弯拉强度均呈现下降的趋势。不参加纤维时,100% 建筑垃圾掺量的水泥稳定建筑垃圾的 28 d 抗压强度、90 d 抗弯拉强度分别比普通水稳碎石(建筑垃圾掺量为 0)降低了 16.5%、24.4%。建筑垃圾压碎值较大,采用静压法成型试件后,大量粗集料被压碎,水泥稳定建筑垃圾的实际级配更偏向于悬浮密实结构,缺乏足够的粗集料以形成相互嵌挤的骨架,更容易受荷载作用而破坏。掺加纤维后,不同建筑垃圾掺量水泥稳定建筑垃圾的 28 d 抗压

强度、90 d 抗弯拉强度均增大,建筑垃圾掺量为 100% 时,掺纤维水泥稳定建筑垃圾的 28 d 抗压强度、90 d 抗弯拉强度分别比不掺纤维的水泥稳定建筑垃圾增大了 10.1%、17.1%。纤维的抗变形能力远高于水稳碎石,纤维在水稳碎石中呈均匀的乱向分布,起到了加筋作用和桥接作用,可以连接水泥水化产物,增强水稳碎石抵抗变形的能力。

3.2 干缩抗裂性能试验

干缩抗裂试验结果示于表 9。

由表 9 可知:随着建筑垃圾掺量的逐渐增大,水泥稳定建筑垃圾的 28 d 干缩系数也随之增加。不掺加纤维时,100%建筑垃圾掺量水泥稳定建筑垃圾的 28 d 干缩系数比普通水稳增大了 36.1%。建筑垃圾的吸水率远高于普通碎石,导致水泥稳定建筑垃圾的早期失水率偏大;此外,建筑垃圾的压碎值较大,集料表面孔隙较多,造成水泥稳定建筑垃圾混合料的实际级配偏细,细集料含量偏大,对水泥稳定建筑垃圾的干缩抗裂性能造成了不利的影响。因此,在实际应用时,应重

视水泥稳定建筑垃圾混合料的早期养生,并尽量采用粗集料含量较大的设计级配,以控制混合料的干缩变形。掺加纤维后,不同建筑垃圾掺量水泥稳定建筑垃圾的 28 d 干缩系数均增大,建筑垃圾掺量为 100% 时,掺纤维水泥稳定建筑垃圾的 28 d 干缩系数比不掺纤维的水泥稳定建筑垃圾降低了 19.4%。掺加纤维后,水稳碎石的空隙率降低,水分散失速度降低,进而降低了水泥稳定建筑垃圾的失水收缩变形;此外,玄武岩纤维出色的抗变形能力也降低了水稳碎石的收缩变形,进而大幅度改善了水稳碎石的干缩抗裂性能。

3.3 耐久性能试验

参考 JTG E51—2009《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》成型试件,进行抗冲刷性能试验、抗冻性试验、抗疲劳性能试验,其中,抗冲刷性能试验龄期为 28 d,冲刷时间为 30 min,冲刷荷载为 0.5 MPa;冻融循环次数为 5 次,试验龄期为 28 d;抗疲劳性能试验采用控制应力法,应力比取 0.6、0.7,试验龄期为 90 d。试验结果如表 10 所示。

表 10 水泥稳定建筑垃圾耐久性能试验结果

| 纤维掺量/% | 建筑垃圾掺量/% | 冲刷率/% | 抗压强度/MPa | | 冻稳系数/% | 抗弯拉强度/MPa | 不同应力比时疲劳寿命/次 | |
|--------|----------|-------|----------|------|--------|-----------|--------------|--------|
| | | | 冻融前 | 冻融后 | | | 0.6 | 0.7 |
| 0 | 0 | 0.36 | 8.04 | 8.15 | 101.4 | 1.39 | 143 815 | 11 681 |
| | 25 | 0.49 | 7.70 | 7.63 | 99.3 | 1.32 | 127 832 | 10 937 |
| | 50 | 0.66 | 7.41 | 7.23 | 97.6 | 1.20 | 112 953 | 10 344 |
| | 75 | 0.81 | 7.08 | 6.82 | 96.3 | 1.11 | 102 384 | 9 832 |
| | 100 | 0.96 | 6.71 | 6.32 | 94.2 | 1.05 | 93 254 | 9 138 |
| 0.06 | 0 | 0.29 | 8.59 | 8.77 | 102.1 | 1.68 | 169 232 | 12 959 |
| | 25 | 0.41 | 8.16 | 8.20 | 100.7 | 1.59 | 152 403 | 12 032 |
| | 50 | 0.52 | 7.96 | 7.87 | 98.9 | 1.44 | 137 869 | 11 390 |
| | 75 | 0.77 | 7.51 | 7.36 | 98.2 | 1.32 | 127 685 | 10 954 |
| | 100 | 0.82 | 7.14 | 6.83 | 96.5 | 1.23 | 118 198 | 10 287 |

由表 10 可知:

(1) 随着建筑垃圾掺量的增大,水泥稳定建筑垃圾的冲刷质量损失率逐渐增大,抗冲刷性能逐渐降低。不掺加纤维时,100%建筑垃圾掺量水泥稳定建筑垃圾的冲刷质量损失率比普通水稳碎石增大了 166.7%。这是因为建筑垃圾压碎值大,水泥稳定建筑垃圾混合料的级配更加偏向于悬浮密实级配,混合料孔隙率较大、细集料含量偏多;此外,水泥稳定建筑垃圾的强度低于普通水稳碎石,集料之间的黏附力较小,在“泵吸作用”下,细集料更容易被吸走。掺加纤维后,不同建筑垃圾掺量水泥稳定建筑垃圾的冲刷质量损失率均减

小,建筑垃圾掺量为 100% 时,掺纤维水泥稳定建筑垃圾的冲刷质量损失率比不掺纤维的水泥稳定建筑垃圾降低了 14.6%。掺加纤维后,水泥稳定建筑垃圾的强度增大,细集料与水泥胶结料、粗集料之间的黏结更为紧密,更难以被“泵吸作用”吸走。

(2) 随着建筑垃圾掺量的增大,水泥稳定建筑垃圾的冻稳系数逐渐减小,抗冻性逐渐降低。不掺加纤维时,100%建筑垃圾掺量水泥稳定建筑垃圾的冻稳系数比普通水稳碎石降低了 7.1%。建筑垃圾孔隙较多,吸水率远高于普通碎石,水泥稳定建筑垃圾内部空隙水冻胀产生的附加应力重复对材料进行挤压破坏作

用,因此在经过相同的冻融循环后,水泥稳定建筑垃圾抗压强度降低得更多;此外,建筑垃圾压碎值大,强度较低,表面孔隙、裂缝较多,经过冻融循环后强度降低得更多,导致水泥稳定建筑垃圾的抗冻性低于普通水稳碎石。掺加纤维后,不同建筑垃圾掺量水泥稳定建筑垃圾的冻稳系数均增大,建筑垃圾掺量为100%时,掺纤维水泥稳定建筑垃圾的冻稳系数比不掺纤维的水泥稳定建筑垃圾增大了2.4%。这是因为纤维增强了水泥稳定建筑垃圾抵抗变形的能力,降低了冻胀作用对水泥稳定建筑垃圾内部结构的影响。

(3) 随着建筑垃圾掺量的增大,水泥稳定建筑垃圾的疲劳寿命逐渐减小。不掺加纤维时,应力比为0.6、建筑垃圾掺量为100%的水泥稳定建筑垃圾的疲劳寿命较普通水稳碎石降低了35.2%,应力比为0.7、建筑垃圾掺量为100%的水泥稳定建筑垃圾的疲劳寿命较普通水稳碎石降低了21.6%。建筑垃圾表面孔隙较多,与普通水稳碎石相比,水泥稳定建筑垃圾的实际级配偏细,其级配更偏向于悬浮密实结构,粗集料间形成的骨架不够紧密;此外,建筑垃圾本身的强度较低,导致混合料结构强度较低,因此在疲劳微裂纹扩展时,水泥稳定建筑垃圾遇到的阻碍较小,裂缝扩展更快,造成了水泥稳定建筑垃圾的疲劳寿命小于普通水稳碎石。掺加纤维后,不同建筑垃圾掺量水泥稳定建筑垃圾的疲劳寿命均增大,应力比为0.6、建筑垃圾掺量为100%时,掺纤维水泥稳定建筑垃圾的疲劳寿命较不掺加纤维的水泥稳定建筑垃圾增大了26.7%;应力比为0.7、建筑垃圾掺量为100%时,掺纤维水泥稳定建筑垃圾的疲劳寿命较普通水稳碎石增大了12.6%。呈乱向分布的纤维均匀地散布在水稳碎石中,将水稳碎石薄弱界面约束住,起到了扩散荷载的作用,防止了应力集中和疲劳微裂纹扩展,增强了水泥稳定建筑垃圾的抗变形能力。

4 结论

(1) 掺加玄武岩纤维后,水泥稳定建筑垃圾的7 d抗压强度大幅度增加,当纤维掺量为0.06%、长度为18 mm时,水泥稳定建筑垃圾7 d抗压强度最高。

(2) 随着建筑垃圾掺量的增大,水泥稳定建筑垃圾的力学性能、干缩抗裂性能、抗冲刷性能、抗冻性能、抗疲劳性能逐渐降低。不掺加纤维时,100%建筑垃圾掺量的水泥稳定建筑垃圾的28 d抗压强度、90 d抗弯

拉强度分别比普通水稳碎石降低了16.5%、24.4%,28 d干缩系数增大了36.1%,冲刷损失率增大了166.7%,冻稳系数降低了7.1%,疲劳寿命降低了35.2%(0.6应力比)、21.6%(0.7应力比)。

(3) 掺加玄武岩纤维后,水泥稳定建筑垃圾的力学性能、干缩抗裂性能、抗冲刷性能、抗冻性能、抗疲劳性能均有不同程度的提高。建筑垃圾掺量为100%时,掺纤维水泥稳定建筑垃圾的28 d抗压强度、90 d抗弯拉强度分别比不掺纤维的水泥稳定建筑垃圾增大了10.1%、17.1%,28 d干缩系数降低了19.4%,冲刷损失率降低了14.6%,冻稳系数增大了2.4%,疲劳寿命提高了26.7%(0.6应力比)、12.6%(0.7应力比)。

(4) 随着建筑垃圾掺量的增大,水泥稳定建筑垃圾的路用性能降低;掺加纤维后,水泥稳定建筑垃圾的路用性能均有不同程度的提升。建筑垃圾掺量小于等于75%时,掺纤维水泥稳定建筑垃圾可应用于重交通荷载等级下高速公路基层中。

参考文献:

- [1] 李万举,丛铖东,王文宏.建筑垃圾材料在北京公路工程中的试验研究[J].中外公路,2019(4).
- [2] 杨逢炜.建筑垃圾在公路工程中的应用研究[J].绿色环保建材,2019(6).
- [3] 肖杰,吴超凡,湛哲宏,等.水泥稳定砖与混凝土再生集料基层的性能研究[J].中国公路学报,2017(2).
- [4] 文华,杨涛,刘颖,等.再生骨料作为轻交通量公路基层材料路用性能研究[J].混凝土与水泥制品,2018(7).
- [5] 周新锋,徐希娟,李晓娟.水泥稳定建筑垃圾再生材料用于道路基层的性能研究[J].筑路机械与施工机械化,2016(8).
- [6] 李明杰,蒋应军,戴经梁.水泥稳定碎石缩裂机理及在级配设计中应用[J].武汉理工大学学报,2010(3).
- [7] 焦双健,李淑,陈玉娇.玄武岩纤维水泥稳定碎石配合比试验研究[J].混凝土与水泥制品,2014(3).
- [8] 李淑.玄武岩纤维水泥稳定碎石路用性能试验研究[D].中国海洋大学硕士学位论文,2014.
- [9] 谢晓文.建筑垃圾再生材料加工及在道路工程中的应用技术研究[D].西安理工大学硕士学位论文,2019.
- [10] 李行,吴超凡,万暑,等.建筑垃圾在路基回填材料中的使用性能研究[J].中外公路,2019(1).
- [11] 吴涛.玄武岩纤维对乳化沥青水泥稳定碎石性能的影响研究[J].路基工程,2019(2).
- [12] 张欣.掺玄武岩纤维水泥固化风积砂路用性能研究[D].内蒙古工业大学硕士学位论文,2018.