

钢纤维增强砼力学及耐久性能研究

梁志成

(山西省交通新技术发展有限公司, 山西 太原 030032)

摘要: 砼作为常见基建材料在工程项目中被广泛应用,随着现代化建设水平的提升,对砼的综合性能提出了更高的要求。文中将钢纤维以不同体积掺量掺入砼中,对不同龄期下砼的力学性能和耐久性能进行试验分析。结果表明,钢纤维能提升砼的力学性能,其中抗折强度的提升效果最显著;结合纤维砼的生产成本及耐久性能,砼中钢纤维掺量宜为 0.8%~1.2%。

关键词: 公路;钢纤维;砼;力学性能;耐久性能

中图分类号: U418.6

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2020)03-0081-05

砼具有较高的抗压强度,被应用于各行业工程项目中。随着现代化建设水平的提高,对砼的性能提出了新的要求。伴随着砼强度的提升,其耐久性能会呈现一定程度劣化和结构破坏。中国沿海地区建筑物病害调研结果表明,砼保护层会受环境影响而出现脱落,砼的耐久性与密实程度有直接关联。因此,研究高强和高耐久性的砼对应特殊地区建筑需求尤为重要。

钢纤维是通过废旧或边角钢材进行高温熔炉和拉丝制备得到的纤维,具有较高抗拉强度和极限延伸率。将钢纤维应用到砼中可加强界面粘结应力,提升砼的综合性能。高丹盈等的研究表明钢纤维的掺入可提高砼的抗压强度和抗拉强度;闫长旺等的研究表明钢纤维的掺入可在一定程度上增强其抗碳化能力。但相关研究对于砼中钢纤维的适宜掺量并未给出统一说法。该文通过改变钢纤维的掺量,对比钢纤维砼的力学性能和耐久性能,确定砼中钢纤维使用范围,提升砼的综合性能。

1 原材料及试验方案

1.1 原材料

(1) 水泥。砼等级为 C40,采用 P.O42.5 普通硅酸盐水泥,其技术性能指标见表 1。

(2) 粗骨料。采用 5~30 mm 碎石,其筛分结果见表 2。

(3) 细骨料。采用中粗砂,细度模数为 2.65,其筛分结果见表 3。

(4) 粉煤灰。粉煤灰是超细颗粒矿料,在水泥砼拌和中可替代部分水泥,填补砼中的微孔结构,增强砼的和易性和工作性能。所用粉煤灰的技术指标

见表 4。

表 1 P.O42.5 普通硅酸盐水泥的技术性能指标

项目	技术指标	检测结果
标准稠度用水量/%	—	25.7
初凝时间/min	≥45	75
终凝时间/min	≤600	165
抗压强度/MPa	3 d	≥22.0
	28 d	≥42.5
抗折强度/MPa	3 d	≥4.0
	28 d	≥6.5

表 2 粗集料的筛分结果

筛孔尺寸/ mm	通过率/ %	筛孔尺寸/ mm	通过率/ mm
26.5	96.8	9.50	17.90
19.0	71.7	4.75	0.78
16.0	58.5	2.36	0.13

表 3 细集料的筛分结果

筛孔尺寸/ mm	通过率/ %	筛孔尺寸/ mm	通过率/ %
4.75	99.1	0.300	11.70
2.36	90.5	0.150	2.40
1.18	71.6	0.075	0.62
0.60	37.9	筛底	—

(5) 钢纤维。采用高强铸钢纤维,内弧面粗糙,外弧面光滑,分散均匀,不结团,其技术指标见表 5。

(6) 减水剂。选用高效减水剂,减水率为 33%,

减水剂用量为1.6%，与砵的结合性较好。

表4 粉煤灰的技术指标

项目	技术指标	检测结果
含水量/%	≤1.0	0.54
细数/%	≤25	14.23
需水量比/%	≤105	99.5
活性指数/%	≥70	85.2
烧失量/%	≤8	4.6

表5 钢纤维的技术指标

项目	技术指标
长度/mm	30~35
宽度/mm	2~2.5
长径比	30~35
抗拉强度	A _{mi} 04-32-600

1.2 试验方案

以体积掺量为基准进行钢纤维外掺,掺量分别为0、0.4%、0.8%、1.2%、1.6%、2.0%、2.4%。对1、3、7、14、28 d 钢纤维砵进行力学性能和耐久性试验,

分析不同钢纤维掺量对不同龄期砵性能的影响。相关试验及测试指标见表6。

表6 试验方案

测试项目	试验名称	测试指标
力学性能	立方体抗压试验	立方体抗压强度
	轴心抗压试验	轴心抗压强度
	弹性模量试验	弹性模量
	劈裂抗拉试验	劈裂抗拉强度
耐久性能	渗水试验	渗水深度、抗渗等级
	抗折试验	抗折强度
	碳化试验	碳化深度

2 配合比设计

钢纤维砵的配合比设计参照普通纤维砵配合比设计流程,搅拌顺序见图1,不同纤维掺量下钢纤维砵的配合比设计结果见表7。

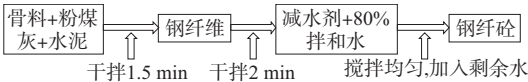


图1 钢纤维砵的搅拌顺序

表7 钢纤维砵的配合比

纤维掺量/%	水泥/ (kg·m ⁻³)	粗骨料/ (kg·m ⁻³)	细骨料/ (kg·m ⁻³)	粉煤灰/ (kg·m ⁻³)	水/ (kg·m ⁻³)	减水剂/ (kg·m ⁻³)	钢纤维/ (kg·m ⁻³)
0.0	375	830	674	162	187	4.36	0.0
0.4	382	813	676	165	189	5.21	29.7
0.8	386	798	681	167	192	5.62	59.4
1.2	394	745	686	172	195	6.31	89.1
1.6	397	722	692	174	196	6.87	118.8
2.0	403	708	697	178	204	7.12	148.5

3 性能试验结果与分析

3.1 立方体抗压强度

立方体抗压试验按《普通混凝土力学性能试验方法标准》进行。不同掺量纤维砵在不同龄期下的立方体抗压试验结果见图2、图3。

由图2和图3可知:随着养护龄期的增加,钢纤维砵立方体抗压强度增大。钢纤维掺量为0~0.8%时,砵立方体抗压强度增幅明显;纤维掺量大于1.2%时,砵立方体抗压强度增长速度减弱。28 d 龄期时,钢纤维掺量为0.4%、0.8%、1.2%、1.6%、

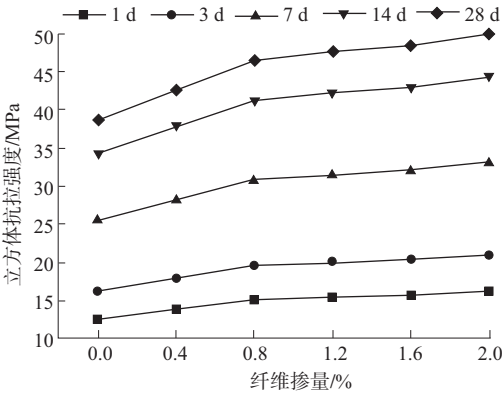


图2 立方体抗压强度与纤维掺量的关系

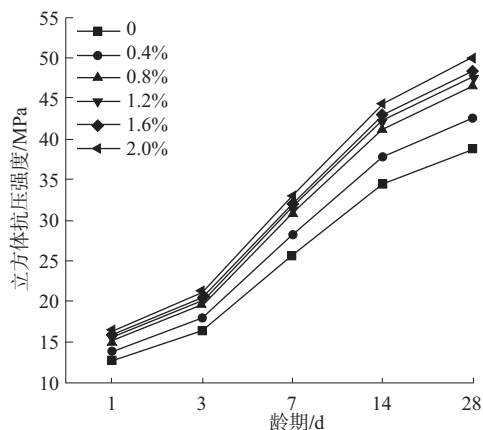


图3 立方体抗压强度与龄期的关系

2.0%时,立方体抗压强度比不参加钢纤维时分别增长10.12%、20.24%、23.57%、25.61%、29.16%。钢纤维的掺入促使材料内部结构更紧密,加上砼中使用减水剂,使钢纤维和砼基体的截面粘结强度提升,从而阻止砼内部裂缝的发生和扩展,在一定程度上改善了砼的受力特性和结构完整性。但是当钢纤维掺量达到一定量时,纤维交错会使砼内部存在一定孔隙,降低砼的密实程度,使砼立方体抗压强度提升速率降低。

3.2 轴心抗压强度

制作150 mm×150 mm×300 mm不同钢纤维掺量、不同龄期砼长方体试件进行轴心抗压试验,试验结果见图4、图5。

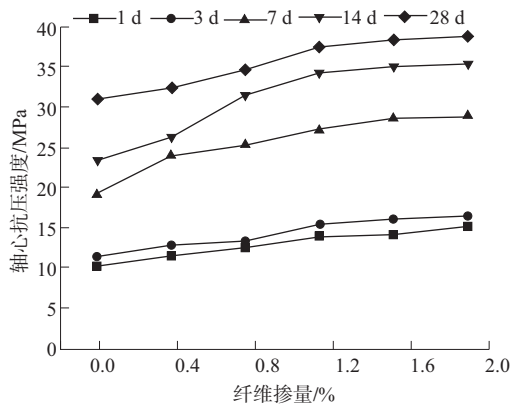


图4 轴心抗压强度与纤维掺量的关系

由图4、图5可知:随着钢纤维掺量的提升,钢纤维砼的轴心抗压强度逐渐提高,且随着龄期的增长,轴心抗压强度逐渐提高。28 d龄期时,钢纤维掺量为0.4%、0.8%、1.2%、1.6%、2.0%时的轴心抗压强度比不掺钢纤维时分别增长4.41%、11.39%、20.37%、23.71%、24.97%。纤维掺量超过1.2%时,

随钢纤维掺量提升,砼轴心抗压强度增长速度有所减缓。轴心抗压强度与立方体抗压强度发展趋势基本一致。

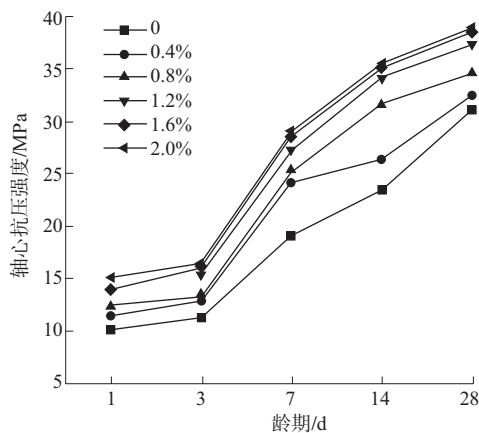


图5 轴心抗压强度与龄期的关系

3.3 劈裂抗拉强度

制作150 mm×150 mm×150 mm不同钢纤维掺量、不同龄期砼立方体试件进行劈裂抗拉试验,试验结果见图6、图7。

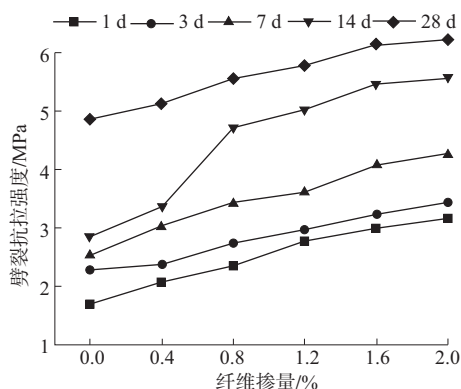


图6 劈裂抗拉强度与纤维掺量的关系

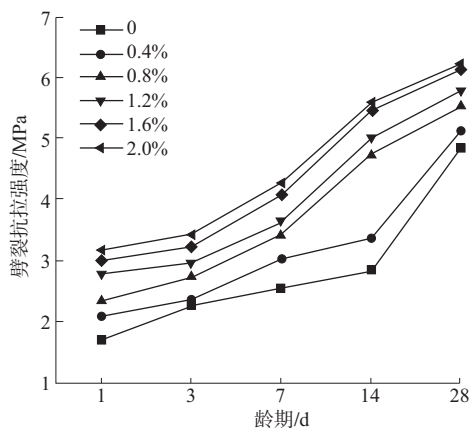


图7 劈裂抗拉强度与龄期的关系

由图6、图7可知:随着钢纤维掺量的提升,钢纤维砼的劈裂抗拉强度逐渐提高,且随龄期的增长,

劈裂抗拉强度逐渐提高。28 d 龄期时,钢纤维掺量为 0.4%、0.8%、1.2%、1.6%、2.0% 时的劈裂抗拉强度比不掺钢纤维时分别增长 5.13%、13.76%、18.69%、26.08%、27.93%。纤维掺量为 0.4% 时,砼的劈裂抗拉强度增长幅度较小;纤维掺量在 1.6% 以上时,砼的劈裂抗拉强度涨幅不明显。钢纤维属于刚性纤维,在砼中起到阻止裂缝扩展的作用,产生增韧阻裂功能。因此,钢纤维的掺入能使砼的劈裂抗拉强度得到提升。

3.4 抗折强度

采用 150 mm×150 mm×550 mm 不同钢纤维掺量、不同龄期砼标准试件进行抗折试验,试验结果见图 8、图 9。

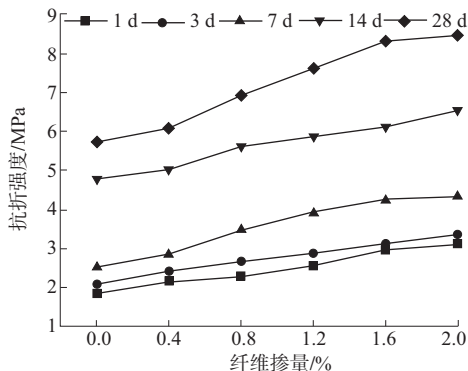


图 8 抗折强度与纤维掺量的关系

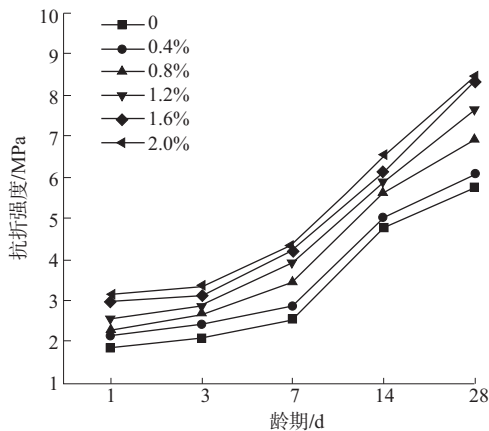


图 9 抗折强度与龄期的关系

由图 8、图 9 可知:随着钢纤维掺量的提升,钢纤维砼的抗折强度逐渐提高,且随着龄期的增长,抗折强度逐渐提高。28 d 龄期时,钢纤维掺量为 0.4%、0.8%、1.2%、1.6%、2.0% 时的抗折强度比不掺钢纤维时分别增长 5.91%、20.35%、32.87%、44.70%、46.78%。纤维掺量达到 1.6% 以上时,砼抗折强度增长速度放缓。钢纤维的掺入使砼的破坏模式有所改

变,在一定程度上提升了砼的延性。

3.5 弹性模量

按实验室标准制备成型不同钢纤维掺量、不同龄期砼试块,养护后进行弹性模量试验,试验结果见图 10、图 11。

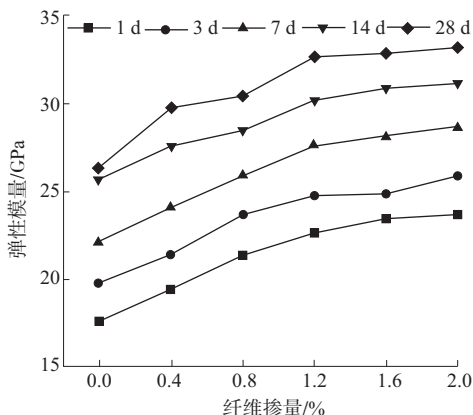


图 10 弹性模量与纤维掺量的关系

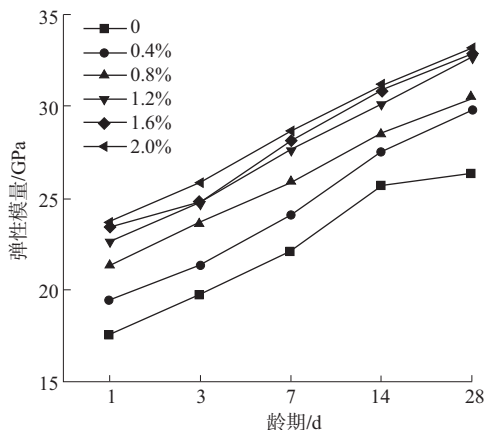


图 11 弹性模量与龄期的关系

由图 10、图 11 可知:随着钢纤维掺量的提升,钢纤维砼的弹性模量逐渐提高,且随着龄期的增长,弹性模量逐渐提高。28 d 龄期时,钢纤维掺量为 0.4%、0.8%、1.2%、1.6%、2.0% 时的弹性模量比不掺钢纤维时分别增长 13.06%、15.49%、23.96%、24.79%、25.74%。随着龄期的增长,砼内部水泥发生水化反应,使砼硬化更充分,水泥胶结作用促进骨料和砂浆粘结强度增加。钢纤维在砼中均匀分布,使砼密实度增加,砼在外部荷载作用下变形幅度减小,砼的弹性模量增加。

3.6 抗渗性能试验

按照《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》对不同钢纤维掺量、不同龄期砼进行水压渗透试验,试验结果见图 12、图 13。

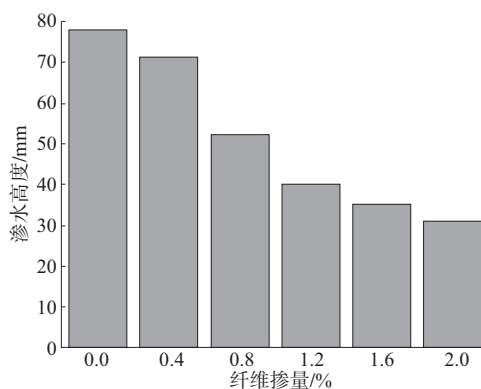


图12 纤维掺量对渗水高度的影响

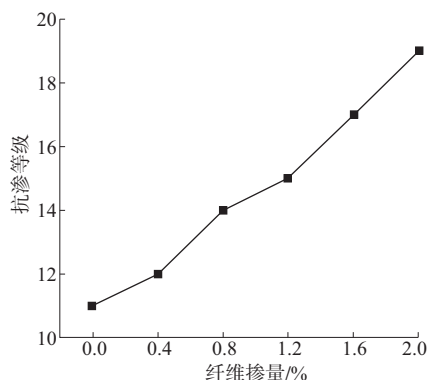


图13 纤维掺量对抗渗性能的影响

由图12、图13可知:随着钢纤维掺量的提高,钢纤维砼的渗水高度逐渐降低,钢纤维掺量为0.4%、0.8%、1.2%、1.6%、2.0%时的渗水高度比不掺钢纤维时分别下降8.97%、33.33%、48.72%、55.13%、60.26%。较少掺量的钢纤维对砼的抗渗性能影响不大,纤维掺量过多时,纤维的交错分布使砼内部结构粘结性增强,但渗水高度下降速率降低。总的来说,钢纤维掺入对砼的抗渗水有明显作用。钢纤维本身具有增韧阻裂的作用,可消减砼裂缝的发生和拓展,纤维的交错分布容易在砼中形成空间网络结构,有利于协调砼中骨料分布的均匀性,使砼表面离析现象减弱,阻断砼中水分子的流通。

3.7 抗碳化性能

砼的碳化对砼结构的安全和耐久性有直接影响。砼的碳化一般是砼中的碱性物质与 CO_2 、水综合产生的化学反应。制备不同钢纤维掺量、不同龄期标准砼试块,在0.03% CO_2 潮湿环境中进行碳化试验,结果见图14、图15。

由图14、图15可知:随着钢纤维掺量的提高,钢纤维砼的碳化深度逐渐降低,且随着龄期的增长,碳化深度逐渐降低。28d龄期时,钢纤维掺量

为0.4%、0.8%、1.2%、1.6%、2.0%时的碳化深度比不掺钢纤维时分别下降12.74%、28.05%、39.19%、45.72%、47.86%。钢纤维的加入能有效抵抗砼的碳化影响,钢纤维的均匀分布能在砼中形成有效空间立体结构,在增强砼内部密实程度的同时,对砼内部结构进行优化,延缓砼裂缝的产生,使砼内部空洞数量大大减少,阻断碳氧化合物对砼的影响。

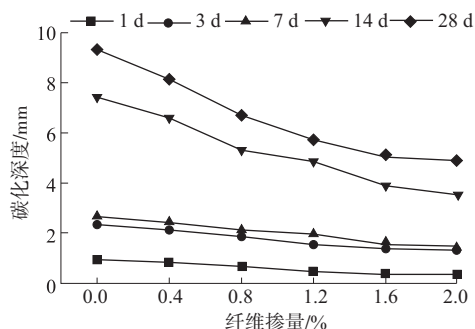


图14 碳化深度与纤维掺量的关系

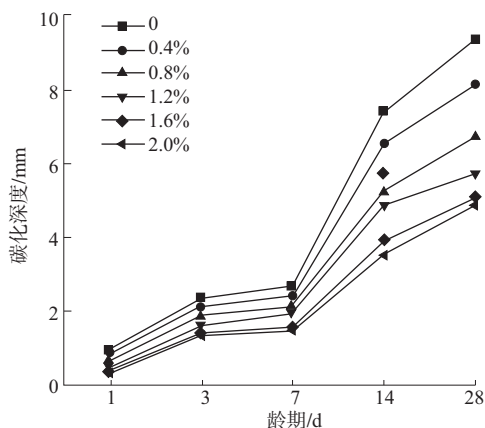


图15 碳化深度与龄期的关系

4 结论

(1) 钢纤维的加入能提高砼的抗压强度、劈裂抗拉强度、抗折强度和弹性模量,其中砼抗折强度的提升效果最显著。纤维掺量为0~0.8%时砼力学性能提升明显,纤维掺量大于1.2%时砼力学性能提升效果减弱,砼中钢纤维的合适掺量为0.8%~1.2%。

(2) 随着纤维掺量的增加,砼的渗水高度和碳化深度不断降低,纤维掺量为0.8%~1.2%时,砼的抗渗等级和碳化深度较好。

(3) 钢纤维的均匀掺入能在砼中形成有效的空间网络分布,对砼起到增韧阻裂的作用,延缓裂缝的

(下转第96页)

增加到 6.0% 时,混合料的平均动稳定度降低。动稳定度随乳化沥青用量的增加呈抛物线变化。

3.3 水泥用量对冷再生混合料性能的影响

水泥在冷再生混合料中的作用包括水泥本身的物理—化学反应、水泥与沥青和集料的相互作用。通过测定不同水泥用量下冷再生混合料的空隙率、劈裂强度、动稳定度,分析水泥用量对冷再生混合料性能的影响。在铣刨料中分别加入 1%、2%、3%、4%、5% 的水泥,拌和制成试件,测定其平均空隙率、劈裂强、平均动稳定度,结果见表 7。

表 7 不同水泥用量下冷再生混合料性能试验结果

水泥用量/%	平均空隙率/%	劈裂强度/MPa	平均动稳定度/(次·mm ⁻¹)
1	11.4	2.75	565
2	10.5	3.56	3 267
3	10.1	5.87	5 753
4	10.3	6.52	6 478
5	9.6	7.58	7 843

由表 7 可知:水泥掺量由 1% 增到 5%,冷再生混合料的平均空隙率降低,劈裂强度和平均动稳定度上升。水泥掺量由 1% 增加到 2% 时,混合料的平均空隙率由 11.4% 降到 10.5%;水泥掺量从 2% 增加到 5%,混合料平均空隙率变化幅度减小,并慢慢趋于稳定。随着水泥掺量的增加,混合料的劈裂强度、动稳定度都得到提高。其原因,一方面是由于空隙率下降,密实度提高,使混合料的强度增加;另一方面,由于水泥的水化作用,混合料的强度大幅提高,这是混合料强度不断增加的主要因素。

4 结论

(1) 不同乳化剂会影响冷再生混合料的配伍

性,进而影响其工作性能。在相同制作条件下,采用不同乳化剂配制的冷再生混合料的空隙率有所不同,会影响混合料的耐久性、劈裂强度、车辙性能、水稳定性等。

(2) 乳化沥青用量对冷再生混合料空隙率、劈裂强度、动稳定度都会产生影响。乳化沥青含量增加,冷再生混合料的最大理论密度减小,空隙率随乳化沥青含量增加到一定程度后保持在 10% 左右;随着乳化沥青含量的增加,劈裂强度在一定范围内先升高后下降,动稳定度先升高后下降但下降趋势更明显。

(3) 水泥掺量增加会使冷再生混合料的空隙率降低,劈裂强度、动稳定度提高,过多的水泥会使混合料的刚度大幅提高,影响混合料的粘弹性,使混合料容易出现早期开裂等不良反应。

(4) 外加剂对冷再生混合料性能有较大影响,使用时需通过试验确定其合理掺量,少量或过量都会对冷再生混合料性能产生不利影响。

参考文献:

- [1] 夏伟.沥青冷再生混合料性能研究及应用[D].北京:北京交通大学,2018.
- [2] 常战雷.冷再生沥青混合料性能及应用研究[D].北京:北京交通大学,2018.
- [3] 周志刚,孙宁,杨文灿,等.厂拌热再生 SBS 改性沥青优化设计方法研究[J].公路交通科技,2017,34(11).
- [4] JTG F41—2008,公路沥青路面再生技术规范[S].
- [5] 刘大维,李艳春.以再生沥青混凝土路面材料和预制混凝土废料为骨料的混凝土环境性能和力学分析[J].中外公路,2015,35(2).
- [6] 田隽.沥青铣刨料冷再生混合料性能与路面结构适应性研究[D].济南:山东大学,2017.

收稿日期:2019-09-10

(上接第 85 页)

发生,增加结构的安全性和耐久性,具有较强的力学性能表现,应用前景较广阔。

参考文献:

- [1] 汪振双,谭晓倩.钢纤维再生粗集料混凝土的力学性能和抗冻性研究[J].硅酸盐通报,2016,35(4).
- [2] 王德辉,史才军,吴林妹.超高性能混凝土在中国的研究和应用[J].硅酸盐通报,2016,35(1).
- [3] 高丹盈,张明,朱海堂.钢筋钢纤维高强混凝土梁疲劳

- 试验研究及刚度计算[J].建筑结构学报,2013,34(8).
- [4] 鞠彦忠,王德弘,康孟新.不同钢纤维掺量活性粉末混凝土力学性能的试验研究[J].应用基础与工程科学学报,2013,21(2).
- [5] 李燕飞,杨健辉,丁鹏,等.混杂纤维混凝土力学性能研究[J].玻璃钢/复合材料,2013(2).
- [6] 高丹盈,李哈,杨帆.聚丙烯—钢纤维增强高强混凝土高温性能[J].复合材料学报,2013,30(1).

收稿日期:2019-06-24