

文章编号:1674-2869(2018)04-0435-05

混杂纤维轻骨料混凝土的力学和抗冻性能研究

刘胜兵,靳哲鑫,姚鹏飞

武汉工程大学土木工程与建筑学院,湖北 武汉 430074

摘要:为了研究钢纤维和聚丙烯纤维对轻骨料混凝土性能的影响,共设计了16组轻骨料混凝土试件,其中有9组混杂纤维轻骨料混凝土,3组钢纤维轻骨料混凝土,3组聚丙烯纤维轻骨料混凝土和1组普通轻骨料混凝土试件。试验结果表明:当钢纤维体积率为1.0%,聚丙烯纤维体积率为0.05%时,混凝土的抗压强度最大为39.16 MPa,提高了17.92%;当钢纤维体积率为1.5%时,抗拉强度最大为4.77 MPa,提高了63.36%。50次冻融循环试验后混凝土的强度损失率最低的是Ssp3组,即钢纤维体积率为1.0%,聚丙烯纤维体积率为0.15%时,强度损失率最低为1.79%,降低了68.92%。

关键词:轻骨料混凝土;混杂纤维;力学和抗冻性能

中图分类号:TU528.58

文献标识码:A

doi:10.3969/j.issn.1674-2869.2018.04.017

Mechanical and Frost Resistance Properties of Lightweight Aggregate Concrete Reinforced by Hybrid Fiber

LIU Shengbing, JIN Zhixin, YAO Pengfei

School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China

Abstract: To study the effect of steel fiber and polypropylene fiber on the performance of lightweight aggregate concrete, 16 groups of lightweight aggregate concrete were designed including 9 groups of hybrid fiber reinforced lightweight aggregate concrete, 3 groups of steel fiber reinforced lightweight aggregate concrete, 3 groups of polypropylene fiber reinforced lightweight aggregate concrete and 1 group of lightweight aggregate concrete without fiber. The test results showed that the maximum compressive strength of concrete was 39.16 MPa, increasing by 17.92% when the volume fractions of steel fiber and polypropylene fiber were 1.0% and 0.05%, respectively. The maximum tensile strength was 4.77 MPa, increasing by 63.36% when the volume fraction of steel fiber was 1.5%. After 50 times of freezing and thawing test, the lowest strength loss rate of concrete was the group of Ssp3. The lowest strength loss rate of concrete specimen was 1.79%, decreasing by 68.2% when the volume fractions of steel fiber and polypropylene fiber were 1.0% and 0.15%, respectively.

Keywords: lightweight aggregate concrete; hybrid fiber; mechanical and frost resistance properties

轻骨料混凝土是指采用轻粗骨料、轻砂(或普通砂)、水泥和水配制而成的干表观密度不大于1 950 kg/m³的混凝土^[1]。在混凝土中掺入纤维是改善混凝土性能的有效手段^[2],研究结果表明^[3-5]:在普通混凝土中掺加适量的高弹性模量的纤维可

明显提高混凝土的强度,而掺加适量的低弹性模量或高延伸率的纤维可明显提高混凝土的韧性。

混凝土的耐久性和力学性能同样重要,混凝土耐久性是指结构在设计使用年限内抵抗外界环境和内部本身侵蚀破坏作用、正常使用及外观使人

收稿日期:2017-10-03

基金项目:湖北省教育厅科学研究计划项目(B2015313)

作者简介:刘胜兵,博士,副教授。E-mail:ajie2046@sina.com

引文格式:刘胜兵,靳哲鑫,姚鹏飞. 混杂纤维轻骨料混凝土的力学和抗冻性能研究[J]. 武汉工程大学学报,2018,40(4):435-439.

可接受的能力^[6-7]。相关研究表明^[8-9]在混凝土中掺入单一纤维对混凝土性能的改善有限,若要改善混凝土的综合性能可以将两种或两种以上的纤维按不同尺寸和不同性能混杂后掺入混凝土基体,通过取长补短,在不同层面相互协调工作,从而提高混凝土的综合性能。

美国是最早将轻骨料混凝土应用于建筑工程的国家。美国在 1970 年至 1990 年修建的 400 多座大跨度桥梁中便广泛使用了轻骨料混凝土^[10]。其次日本、德国、挪威等国家在对轻骨料混凝土的研究较为深入。我国直到 20 世纪 50 年代才开始着手这方面的研究^[11]。在轻骨料混凝土研究的初期,由于混凝土强度过低、生产工艺落后等原因,轻骨料混凝土只能应用于非承重构件或者围护结构,随着我国近年来的高速发展,轻骨料混凝土的研究与国外先进水平的差距也逐渐缩小,轻骨料混凝土的研究和应用技术也直逼世界先进水平^[12]。

目前,对混杂纤维轻骨料混凝土的研究还比较少,尤其是耐久性方面的研究更少。本文通过试验研究混杂纤维及单掺纤维对轻骨料混凝土的立方体抗压、劈裂抗拉及抗冻性能的影响。

1 试验部分

1.1 试验材料和技术性能

- 1)水泥:选用武汉华新水泥厂的 42.5 级普通硅酸盐水泥。
- 2)轻粗骨料:湖北宜昌宝珠陶粒开发有限公司生产的高强页岩陶粒,碎石型。表观密度为

- 1 330 kg/m³,堆积密度 800 kg/m³,粒径不大于 20 mm。
- 3)细骨料:天然河砂,中砂。
- 4)减水剂:为提高混凝土和易性,减水剂采用 FDN 高效减水剂,减水率达 15%~25%。
- 5)纤维:钢纤维和聚丙烯纤维,性能指标见表 1。

表 1 两种纤维的物理和力学性能

Tab. 1 Physical and mechanical properties of two fibers

纤维种类	密度 / (g/cm ³)	抗拉强度 / MPa	弹性模量 / GPa	长度 / mm	纤维类型
钢纤维	7.8	1 200	200	37	波纹型
聚丙烯纤维	0.91	287	>3.5	19	束状单丝

1.2 试验方案

试验中选定钢纤维体积率和聚丙烯纤维体积率两个影响因素^[13],进行单掺纤维轻骨料混凝土和混杂纤维轻骨料混凝土的基本力学性能和抗冻性能的试验研究。基本力学性能试验包括立方体抗压试验和劈裂抗拉试验,其中立方体抗压和抗冻试验每组 3 个试件,试件尺寸均为 100 mm×100 mm×100 mm;劈裂抗拉试验每组 3 个试件,试件尺寸为 150 mm×150 mm×150 mm。

本次试验中轻骨料混凝土的强度等级为 LC30,是根据《纤维混凝土技术及应用》^[14]的要求及《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》^[15]中有关配合比设计的规定采用松散体积法确定的,见表 2。

表 2 混凝土配合比设计

Tab. 2 Mixing proportion design of concrete

混凝土强度等级	陶粒的用量 / (kg/cm ³)	砂的用量 / (kg/cm ³)	水泥的用量 / (kg/cm ³)	水的用量 / (kg/cm ³)
LC30	1 330	686	440	190

为了分别比较单掺纤维及混杂纤维对轻骨料混凝土立方体抗压、劈裂抗拉以及抗冻性能影响,本次试验按不同的纤维体积率设计了 9 组混杂纤维轻骨料混凝土,3 组单掺钢纤维轻骨料混凝土,3 组单掺聚丙烯纤维轻骨料混凝土和 1 组普通轻骨料混凝土对比试件,试验分组见表 3。分别将聚丙烯纤维以 0.05%、0.10%、0.15% 的体积掺加率单掺,钢纤维以 1.0%、1.5%、2.0% 的体积掺加率单掺及聚丙烯纤维与钢纤维混杂后掺入轻骨料混凝土基体中对其进行立方体抗压、劈裂抗拉与抗冻性能试验研究。

1.3 试件的制作与所用设备

试验中搅拌混凝土的机器为强制式搅拌机,

以保证拌合物的均匀性,首先将陶粒和细骨料加入搅拌机中干拌 30 s,待二者拌合均匀后加入水泥并观察搅拌情况,待三者搅拌均匀后向搅拌机中加入纤维,最后向搅拌机中加入水进行湿拌制成纤维轻骨料混凝土。将湿拌的纤维轻骨料混凝土立即装入相应的试模后,使用振动台振捣成型。1 d 后拆模,拆模后立即放入标准养护室中养护,养护室相对湿度为 95% 以上,温度为 (20±2) ℃,室内湿度均匀。制作试件的过程中用到的设备有强制式搅拌机、振动台以及混凝土试模。力学性能试验中所用设备为液压式压力试验机;抗冻融循环试验中冻融循环次数为 50 次,采用慢冻法,试验设备为武汉工程大学自主研制的冻融机。

表3 试验分组
Tab. 3 Test grouping

掺纤维的种类	试验编号	钢纤维 体积率 / %	聚丙烯纤维 体积率 / %
普通	LC30	0	0
单掺聚丙烯纤维	S0p1	0	0.05
	S0p2	0	0.10
	S0p3	0	0.15
单掺钢纤维	S1p0	1.0	0
	S2p0	1.5	0
	S3p0	2.0	0
1 混杂纤维	Ssp1	1.0	0.05
	Ssp2	1.0	0.10
	Ssp3	1.0	0.15
2 混杂纤维	Ssp4	1.5	0.05
	Ssp5	1.5	0.10
	Ssp6	1.5	0.15
3 混杂纤维	Ssp7	2.0	0.05
	Ssp8	2.0	0.10
	Ssp9	2.0	0.15

2 结果与讨论

2.1 立方体抗压试验与劈裂抗拉试验结果

本次试验中基本力学性能试验包括立方体抗压与劈裂抗拉试验,每组试件的抗压和抗拉强度值为其3个试件的算术平均值,立方体抗压与劈裂抗拉试验的结果见表4。

表4 抗压与抗拉试验结果平均值

试验编号	抗压强度 / MPa	劈裂抗拉强度 / MPa
LC30	33.21	2.92
S0p1	33.30	3.29
S0p2	37.40	3.30
S0p3	36.26	2.47
S1p0	37.03	3.67
S2p0	30.51	4.77
S3p0	31.51	4.44
Ssp1	39.16	4.45
Ssp2	33.77	4.11
Ssp3	32.62	2.73
Ssp4	37.59	4.37
Ssp5	36.80	4.26
Ssp6	33.91	3.34
Ssp7	36.16	4.64
Ssp8	32.40	4.04
Ssp9	30.65	3.07

由表4可以看出:1)在轻骨料混凝土中掺入适量纤维可以提高混凝土的立方体抗压强度和劈拉强度。2)钢纤维或聚丙烯纤维及二者混杂均不同程度提高了基体的立方体抗压强度,当钢纤维体积率为1.0%,聚丙烯纤维体积率为0.05%时,立方体抗压强度最大为39.16 MPa,相较于对照组提高了17.92%。3)钢纤维对基体劈裂抗拉强度的提高尤其明显,并且提高幅度大于聚丙烯纤维,其中单掺钢纤维体积率为1.5%时,劈拉强度最大为4.77 MPa,相较于对照组提高了63.36%。轻骨料混凝土中掺入纤维后,轻骨料混凝土的破坏过程及破坏形态有明显改善,图1为劈拉试验中掺入不同纤维时轻骨料混凝土的破坏形态。

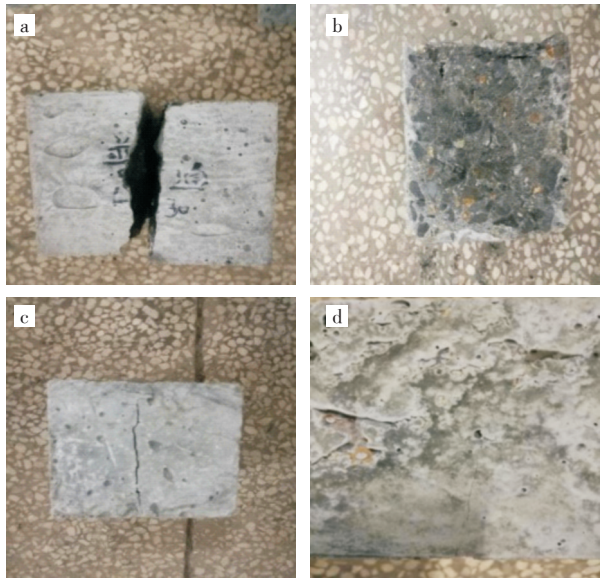


图1 不同纤维体积率的情况下试块的破坏形态:
(a)和(b)素轻骨料混凝土,(c)混杂纤维轻骨料混凝土,
(d)钢纤维轻骨料混凝土

Fig. 1 Destruction form of cube in different fiber volume fractions: (a) and (b) plain lightweight aggregate concrete, (c) hybrid fiber reinforced lightweight aggregate concrete, (d) steel fiber lightweight aggregate concrete

试验过程中,当荷载达到一定数值后,素轻骨料混凝土表面首先出现1~2条微小的裂缝,随着试验的进行,在原微裂缝的远处相继出现其他裂缝,随着荷载进一步增加,裂纹的宽度迅速增大,长度也迅速增长,直到裂缝由上至下贯通整个试块,随即混凝土试件碎裂成块而破坏,这种破坏是突发的,表现出明显的脆性。钢纤维和混杂纤维轻骨料混凝土试块达到极限承载力后,试块表面裂缝的发展有一定过程,极限承载力虽不能增长,但是下降速度明显放缓,试块破坏时,纤维还在试块表面将试块连成一个整体,试块表现出良好的延

性。掺入钢纤维的轻骨料混凝土尤其明显,混凝土试块达到极限承载力时,试块表面出现多条裂纹,此时继续加载,可以听到纤维因拔断而发出的明显噼啪声,此时试件仍没有破坏,并且在较长的一段时间里试件仍具有较大的承载力,试件表现出较强的韧性。因此,不难看出素轻骨料混凝土

中掺入纤维可以有效改善混凝土的脆性。

2.2 抗冻融循环试验

混凝土抗 50 次冻融循环试验采用慢冻法,测定混凝土 50 次冻融循环后的强度损失率,每组试件的强度损失率为其 3 个试件的算术平均值,试验结果见图 2。

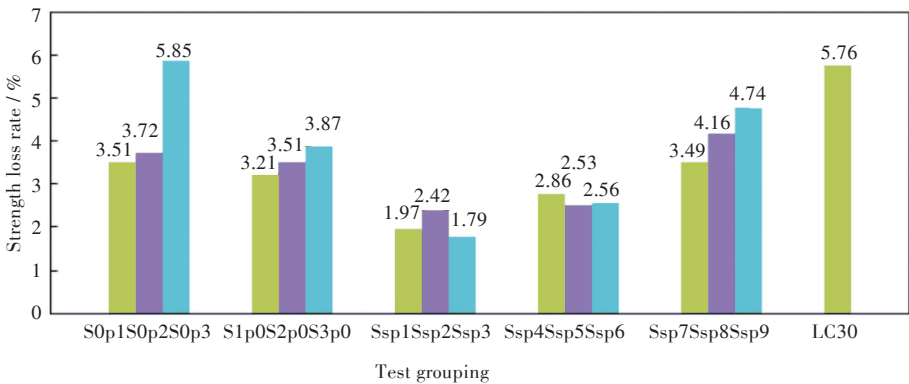


图 2 混凝土强度损失率
Fig. 2 Strength loss rate of concretes

混凝土抗冻融循环试验后强度损失率越小表示混凝土抗冻性能越好。由图 2 可以看出在素轻骨料混凝土基体中掺入纤维均不同程度地降低了混凝土基体的强度损失率。混杂纤维系列尤其明显,其中混杂纤维系列中,当钢纤维体积率为 1.0%,聚丙烯纤维体积率分别为 0.05%、0.10%、0.15%时,混凝土强度损失率较素轻骨料混凝土分别降低了 65.80%、57.80%、68.92%;当钢纤维体积率为 1.5%,聚丙烯纤维体积率分别为 0.5%、0.10%、0.15%时,混凝土强度损失率较素轻骨料混凝土分别降低了 52.08%、56.08%、55.56%;而当钢纤维体积率提高到 2%时,聚丙烯纤维体积率分别为 0.05%、0.10%、0.15%时,强度损失率较素轻骨料混凝土分别降低了 39.41%、27.78%、17.71%。

2.3 混杂效应分析

为研究上述抗冻融循环试验中阐述的现象,引入纤维混杂系数与增强系数^[15],定义强度损失随纤维掺量情况变化的衰减系数为:

$$\beta_3 = F_1 / F_2 \tag{1}$$

式(1)中: β_3 为掺入纤维后混凝土的强度损失衰减系数; F_1 为掺入纤维后混凝土的强度损失率; F_2 为素轻骨料混凝土的强度损失率。

混杂效应应考虑 2 种纤维在单一状态下对水泥基材料作用的乘积,定义强度损失随纤维掺量情况变化的混杂系数为:

$$\alpha_3 = \frac{\beta_{ef}}{\beta_e \cdot \beta_f} \tag{2}$$

式(2)中: α_3 为混杂纤维轻骨料混凝土强度损失随纤维掺量情况变化的混杂系数; β_{ef} 为混杂纤维轻骨料混凝土的强度衰减系数; β_e 为单掺钢纤维轻骨料混凝土强度衰减系数; β_f 为单掺聚丙烯纤维轻骨料混凝土强度衰减系数。由混杂系数公式不难看出,当 $\alpha_3 \leq 1$ 时为正混杂效应,当 $\alpha_3 \geq 1$ 时为负混杂效应。表 5 列出了以 LC30 轻骨料混凝土为基准,各组混杂纤维轻骨料混凝土的纤维体积率对应的衰减系数和混杂系数。

表 5 强度损失率和混杂系数		
Tab. 5 Strength loss rate and hybrid coefficient		
试验编号	强度损失率衰减系数	纤维混杂系数
LC30	1.000	
S0p1	0.609	
S0p2	0.646	
S0p3	1.016	
S1p0	0.557	
S2p0	0.609	
S3p0	0.672	
Ssp1	0.342	1.008
Ssp2	0.420	1.167
Ssp3	0.311	0.549
Ssp4	0.479	1.292
Ssp5	0.439	1.116
Ssp6	0.444	0.718
Ssp7	0.606	1.481
Ssp8	0.722	1.663
Ssp9	0.823	1.205

观察表5中的强度损失率衰减系数和混杂系数,部分混杂系列组虽然衰减系数小于1,但是混杂系数却大于1。说明混杂纤维虽然降低了素轻骨料混凝土的强度衰减系数,但是两种纤维的混杂却产生了负混杂效应。这也体现了探讨混杂系数所带来的意义,不单看某一种纤维的作用,而是从整体来考虑他们的混杂效应。当两种纤维混杂在一起时,混杂纤维所产生的作用大于两种纤维单掺时作用的代数和时即为正混杂效应,反之则为负混杂效应。产生正负混杂效应的原因有很多,如两种不同尺寸的纤维在不同层面上相互协调、相互补充即可产生正混杂效应;而负混杂效应并不表示两种纤维混杂对混凝土没有改善作用。例如本次冻融循环试验中的Ssp8组、Ssp9组,虽然改善了混凝土的抗冻性能,但是却产生了负混杂效应,主要是因为纤维较小的单丝直径及纤维掺量过多之后导致的纤维间距较小,纤维间发生重叠,相互干扰。

3 结 语

- 1)在轻骨料混凝土中掺入适量的混杂纤维可提高混凝土立方体抗压强度和劈裂抗拉强度,当钢纤维体积率为1.0%,聚丙烯纤维体积率为0.05%时,立方体抗压强度最大为39.16 MPa,相较于对照组提高了17.92%。
- 2)钢纤维对混凝土基体劈裂抗拉强度的提高尤其明显。当单掺钢纤维体积率为1.5%,劈拉强度最大为4.77 MPa,相较于对照组提高了63.36%。向轻骨料混凝土中掺入混杂纤维可以有效改善混凝土基体的脆性,使基体由脆性破坏转变为延性破坏。
- 3)当钢纤维体积率为1.0%、聚丙烯纤维体积率为0.15%时,50次冻融循环试验后混杂纤维轻骨料混凝土的强度损失率最低为1.79%,相较于对

照组降低了68.92%。

参考文献:

[1] 高旭,翁维素,孙婧. 轻骨料混凝土的发展现状与展望[J]. 河北建筑工程学院学报,2016,34(2):23-24.

[2] 刘云鹏. 纤维改性轻骨料混凝土的高温力学性能研究[D]. 昆明:昆明理工大学,2017.

[3] 赵鹏飞,毕巧巍,杨兆鹏. 混杂粗纤维轻骨料混凝土的力学性能及耐久性的试验研究[J]. 硅酸盐通报,2008,27(4):853-856.

[4] 刘胜兵,姚鹏飞,靳哲鑫,等. 钢-聚丙烯纤维轻骨料混凝土抗折性能研究[J]. 低温建筑技术,2018,40(1):18-20,27.

[5] 焦楚杰,孙伟,秦鸿根. 聚丙烯-钢纤维高强混凝土弯曲性能试验研究[J]. 建筑技术,2004,35(1):48-50.

[6] 朱亚菲,高建明,王边. 钢纤维高强轻骨料混凝土的试验研究[J]. 混凝土与水泥制品,2001(5):38-40.

[7] 姚鹏飞. 钢-聚丙烯混杂纤维轻骨料混凝土抗压与抗折性能试验研究[D]. 武汉:武汉工程大学,2017.

[8] 蒋思晨. 混杂纤维轻骨料混凝土力学性能及抗冻性能试验研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2012.

[9] 易成,刘燕,安心正. 混凝土耐久性评价体系的缺陷与解决途径[J]. 混凝土,2008(11):32-36.

[10] 袁大伟,杨萃娜. 轻骨料混凝土的研究现状分析及定义探讨[J]. 混凝土,2011(6):26-28.

[11] 张少勇. 轻骨料混凝土的研究和发展现状[J]. 山西建筑,2014,40(33):107-108.

[12] 徐锦平,陈建华,周绍豪. 轻骨料混凝土的应用研究及展望[J]. 建材世界,2007,28(5):11-13.

[13] 朱安标. 钢-聚丙烯混杂纤维高强混凝土耐久性试验研究与评价方法分析[D]. 锦州:辽宁工业大学,2016.

[14] 徐至钧. 纤维混凝土技术及应用[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2003.

[15] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 普通混凝土拌合物性能试验方法标准:GB/T 50080—2016[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2016.

本文编辑:苗 变