

混杂纤维混凝土力学性能研究

张振雷

(辽宁铁道职业技术学院铁道工程系, 锦州 121000)

摘要: 为研究纤维素纤维和玄武岩纤维单一掺入及混合掺入对混凝土强度的影响,通过立方体抗压、劈裂抗拉和抗折试验,分析了不同玄武岩纤维长度(6 mm、12 mm、30 mm)及不同掺量(2.7 kg/m³、4.0 kg/m³、5.4 kg/m³)对混杂纤维混凝土力学性能的影响。试验结果表明:混杂纤维的掺入能使混凝土的立方体抗压、劈裂抗拉及抗折强度均有所提高,当玄武岩纤维掺量为4.0 kg/m³,纤维素纤维掺量为1.6 kg/m³时,其立方体抗压、劈裂抗拉及抗折强度较普通混凝土分别提高了13.94%、35.46%、18.75%;当玄武岩纤维长度为12 mm,掺量为4.0 kg/m³时,纤维混凝土表现出了较好的增强效果,且随着掺量的增加,其强度先增大后减小;单掺纤维素纤维掺量为1.6 kg/m³时,其对混凝土的增强效果最佳。

关键词: 混杂纤维; 力学性能; 纤维长度; 纤维掺量

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0999(2019)06-0043-06

混凝土早已成为当今世界土木工程中应用最为广泛的建筑材料,但是其存在固有的缺点,从而限制了它的应用范围和效果,因此人们在不断地探索新的混凝土材料,使之不断向着优质、高强、高性能的方向发展。玄武岩纤维是一种天然的纤维材料,其与混凝土能够较好地相容^[1],抗拉强度和弹性模量较高,与其他纤维相比价格也较低,拥有良好的应用价值。纤维素纤维是采用高寒地区特殊植物物种为原料制成的,是继化学合成纤维之后发展起来的新型混凝土耐久性专用纤维,具有天然的亲水性和强度高特点^[2],又因其由植物自然生长非人工制作而成,故表面具有很强的握裹力。

近年来,研究发现单一纤维的掺入对混凝土性能的提高有一定的局限性,故越来越多的专家、学者将目光转向了混杂纤维^[3-7]。混杂纤维混凝土是由两种或两种以上纤维混合掺入混凝土基体中,形成的一种能实现不同纤维互相取长补短且能发挥各自优点的新型复合材料。梅国栋等^[8]研究了钢-聚丙烯混杂纤维掺量对轴心抗拉强度的影响,结果表明:混杂纤维能够明显提高混凝土抗折、抗压和劈拉强度。Lawler等^[9]通过试验研究了纤维长度与掺量对混凝土弯曲韧性及抗渗性的影响,研究发现:混凝土早期开裂强度与短纤维含量有关,且呈反比关系,并且在混凝土中掺入混杂纤维与单掺纤维时的断裂形式不同,前者会发生拔断破坏,而后者则表现为拔出破坏。

贺晶晶等^[10]讨论了玄武岩纤维与聚丙烯纤维的“纤维混杂效应”对混凝土基体力学性能的影响,结果表明:玄武岩-聚丙烯混杂纤维混凝土(B-P HFRC)的劈裂抗拉强度和抗折强度明显高于玄武岩纤维混凝土(BFRC)和聚丙烯纤维混凝土(PFRC)。赵卓等^[11]通过试验研究了PVA与纤维素纤维的掺量对混杂纤维混凝土各项力学性能的影响,结果表明:PVA-纤维素混杂纤维混凝土拌合物坍落度主要受PVA纤维的影响,PVA纤维掺量越高,混凝土坍落度损失越大,且在PVA、纤维素纤维的掺量和比例不同时,混杂纤维的增强效果也不尽相同。

虽然对纤维混凝土力学性能的研究已较多,并取得了一些研究成果,但所得出的试验数据离散性还较大,相关理论研究也并不完善。本试验主要研究了玄武岩纤维和纤维素纤维单一掺入及混合掺入对混凝土基本力学性能的影响,以期能为玄武岩-纤维素混杂纤维混凝土在工程领域的应用提供理论依据。

1 试验

1.1 试验材料

试验采用渤海牌普通硅酸盐水泥(P·O 42.5);掺合料为郑州产Ⅱ级粉煤灰,表观密度为2.12 g/cm³;细骨料为普通河沙,细度模数为2.53,属Ⅱ区中砂;粗骨料粒径为5 mm~20 mm;减水剂采用聚羧酸高效减水剂,减水率为28%;拌和水为城市自来水。玄武

收稿日期: 2018-09-28

基金项目: 辽宁省自然科学基金(2015020208)

作者简介: 张振雷(1983-),男,硕士,讲师,主要从事新型土木工程材料理论研究与应用方面的工作。

岩纤维为江苏天龙玄武岩连续纤维股份有限公司生产,性能指标如表1所示;纤维素纤维为常州利尔德通新材料科技有限公司生产,性能指标如表2所示。

表1 玄武岩纤维性能指标

Table 1 Physical properties of basalt fiber

直径 / μm	长度 / mm	密度 / $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	拉伸强度 / MPa	弹性模量 / GPa	断裂伸长 率/%
16	6,12,30	2.65~3.05	3000~3500	90~110	3.2

表2 纤维素纤维性能指标

Table 2 Physical properties of cellulose fiber

直径 / μm	长度 / mm	密度 / $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	抗拉强度 / MPa	弹性模量 / GPa	旦尼尔 / $\text{g}\cdot 9000\text{ m}^{-1}$
17.9	2.1	1.11	913	9.25	2.50

1.2 试验配合比

试验配合比设计考虑三种因素:玄武岩纤维的不同掺量(2.7 kg/m^3 、 4.0 kg/m^3 、 5.4 kg/m^3)和不同长度(6 mm、12 mm、30 mm)以及纤维素纤维的掺量(1.2 kg/m^3 、 1.6 kg/m^3 、 2.0 kg/m^3)。基准组配合比见表3,试验分组见表4。

表3 基准组配合比及材料用量

Table 3 Mix proportion of concrete ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)

水	泥	粉煤灰	砂	石子	水	减水剂
392		168	588	1002	200	2.24

表4 试验分组

Table 4 Test groupings

编号	玄武岩纤维长度 / mm	玄武岩纤维掺量 / $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	纤维素纤维掺量 / $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
NC	-	-	-
B1	12	2.7	-
B2	12	4.0	-
B3	12	5.4	-
C1	-	-	1.2
C2	-	-	1.6
C3	-	-	2.0
H1	6	2.7	1.2
H2	6	4.0	1.6
H3	6	5.4	2.0
H4	12	2.7	1.2
H5	12	4.0	1.6
H6	12	5.4	2.0
H7	30	2.7	1.2
H8	30	4.0	1.6
H9	30	5.4	2.0

注:NC为基准组;B为玄武岩纤维;C为纤维素纤维;H为玄武岩-纤维素混杂纤维。

1.3 试件制作及试验方法

本试验参照CECS 13:2009《纤维混凝土试验方法标准》^[12]进行,立方体抗压强度及劈裂抗拉试验采用 $100\text{ mm}\times 100\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ 的试块,抗折试验采用 $100\text{ mm}\times 100\text{ mm}\times 400\text{ mm}$ 的试件。采用强制式搅拌机。首先,在搅拌机内放入石子和砂,启动搅拌机,在搅拌的同时,将玄武岩纤维缓慢而均匀地撒入搅拌机内,经过1 min的搅拌后,添加水泥和粉煤灰,经过1 min后再向其中均匀地加入水和减水剂,进行2 min搅拌。搅拌完毕后,将其装入试模,让试件在振动台上充分振动密实,室内静置24 h后拆模,随后在标准养护条件下养护至28 d取出晾干。

2 试验结果及分析

2.1 破坏形态分析

普通混凝土试块在进行立方体抗压试验时,破坏较为突然,其表面的混凝土会大量剥落;而掺入混杂纤维后,试件表面基本完整,没有明显的剥落现象。分析其原因可能是由于试件在受压过程中,横跨在裂缝之间的纤维起到了桥接作用,阻碍了裂缝的发展。

在劈裂抗拉试验中,普通混凝土表现为脆性破坏,试件断裂为两半,破坏较为严重;而混杂纤维混凝土试件在达到极限承载力之后,没有直接劈裂成两半,而是沿着劈裂线产生裂缝从而发生破坏,试件保持了较高的整体性。

在抗折试验过程中,普通混凝土试块在加载至峰值荷载后即刻断裂,表现为典型的脆性破坏,而混杂纤维混凝土试件则沿试块中部的下边缘出现自下而上的不规则裂缝,其破坏时间持续较长,表现出较强的韧性。这正是因为两种纤维相互取长补短,可充分发挥各自优势,起到了增韧阻裂的作用。

综上所述,掺入混杂纤维不仅能提高试件的承载力,还可使混凝土的破坏形式由脆性转变为延性破坏。

2.2 强度分析

采用华渊等提出的纤维混凝土增强系数^[13]来评价掺入纤维对混凝土力学性能的影响:

纤维混凝土增强系数:

$$\beta = \frac{f}{f_m} \quad (1)$$

其中： f 、 f_m 分别为纤维混凝土、普通混凝土的各项强度指标； β_c 、 β_t 、 β_r 分别为立方体抗压强度、劈裂抗拉强度和抗折强度的增强系数。当 $\beta > 1$ 时，表示掺入纤维可以提高普通混凝土的性能；而当 $\beta < 1$ 时，掺入纤维对普通混凝土的性能产生了负作用。各组试件的立方体抗压、劈裂抗拉和抗折的试验结果见表 5。

表 5 试验数据

Table 5 Test data of specimens

编号	抗压强度 /MPa	劈裂抗拉强度 /MPa	抗折强度 /MPa	抗压强度增强系数 / β_c	抗拉强度增强系数 / β_t	抗折强度增强系数 / β_r
NC	41.6	3.13	4.8	1.00	1.00	1.00
B1	46.2	3.30	5.3	1.11	1.05	1.10
B2	44.7	3.74	5.5	1.07	1.19	1.15
B3	43.7	4.01	5.6	1.05	1.28	1.17
C1	41.9	3.36	5.4	1.01	1.07	1.13
C2	43.8	3.44	5.6	1.05	1.10	1.17
C3	42.9	4.13	5.3	1.03	1.32	1.10
H1	42.2	3.21	5.3	1.01	1.03	1.10
H2	43.6	3.36	5.5	1.05	1.07	1.15
H3	42.8	3.26	5.2	1.03	1.04	1.08
H4	45.0	3.35	5.5	1.08	1.07	1.15
H5	47.4	4.24	5.7	1.14	1.35	1.19
H6	43.0	3.21	5.4	1.03	1.03	1.13
H7	40.5	3.24	5.1	0.97	1.04	1.06
H8	44.8	3.47	5.4	1.08	1.11	1.13
H9	40.3	3.38	5.3	0.97	1.08	1.10

从表 5 中可以看出：掺入纤维可以有效地提高混凝土的力学性能；单掺玄武岩纤维、纤维素纤维对基体混凝土的增强效果有限，而玄武岩和纤维素纤维混掺则能更好地取长补短，将两者的优势充分发挥出来，在玄武岩纤维长为 12 mm，掺量为 4.0 kg/m³，纤维素纤维掺量为 1.6 kg/m³ 时，混杂纤维对混凝土的增强效果最佳。

2.2.1 立方体抗压强度

混杂纤维混凝土抗压强度增强系数随纤维掺量及长度的变化规律如图 1 所示。

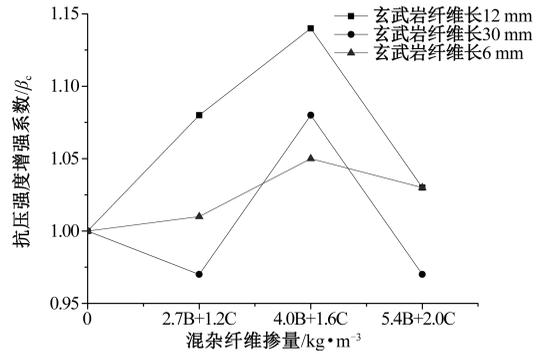


图 1 混杂纤维掺量与抗压强度增强系数的关系

Fig. 1 Effect of hybrid fiber content on compressive strength enhancement factor

由图 3 可知，在不同玄武岩纤维长度（6 mm、12 mm、30 mm）下，试件的立方体抗压强度均在玄武岩纤维掺量为 4.0 kg/m³，纤维素纤维掺量为 1.6 kg/m³ 时达到各自的峰值，且随着纤维掺量的增加显现出先增大后减小的趋势；当玄武岩纤维长为 12 mm 时，各掺配比例下的抗压强度增强系数均为最大，且表现为随着长度的增加，对抗压强度的增强能力先增大后减小；当玄武岩纤维长为 30 mm 时，出现增强系数小于 1 的情况，分析其原因可能是混凝土中掺入过长或过多的玄武岩纤维后，会增加纤维的成团率，使其在混凝土内部产生孔洞，造成许多薄弱界面出现，从而导致抗压强度降低。

单一纤维的掺入对抗压强度增强系数的影响如图 2 所示。

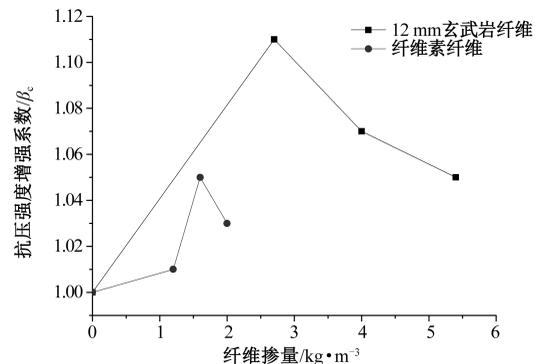


图 2 单一纤维的掺量对抗压强度增强系数的影响

Fig. 2 Effect of fiber content on compressive strength enhancement factor

由图 2 可知，单掺玄武岩纤维、单掺纤维素纤维对试件的抗压强度均有提高作用，但玄武岩纤维的增强效果更加明显，当掺量为 2.7 kg/m³ 时抗压强

度增强系数达到最大,为1.11,而后随着掺量的增大,抗压强度逐渐减小;纤维素纤维表现出相似的规律,其抗压强度随着掺量的增加先增大后减小,在掺量为 1.6 kg/m^3 时对抗压强度的增强能力达到最佳。

2.2.2 劈裂抗拉强度

将劈裂抗拉强度增强系数与混杂纤维的掺加率绘制成散点折线图,如图3所示。

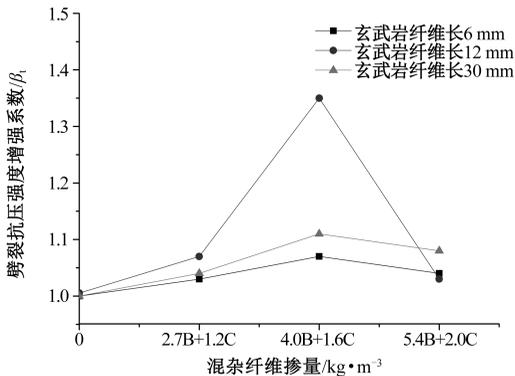


图3 混杂纤维掺量与劈裂抗拉强度增强系数的关系

Fig. 3 Effect of hybrid fiber content on compressive strength enhancement factor

从图3可以看出:随着玄武岩纤维长度的增加,混杂纤维混凝土劈裂抗拉强度增强系数呈现先增后降的趋势,其中12 mm长玄武岩纤维对劈裂抗拉强度的增强能力最好;而各长度下混杂纤维混凝土试件抗拉强度均在玄武岩掺量为 2.7 kg/m^3 ,纤维素纤维掺量为 1.6 kg/m^3 时达到峰值,且表现为随着掺量增加抗拉强度增强系数先增后降。分析其原因可能为:纤维长度越长,结团现象越严重且纤维体积掺量越大,发生结团现象的概率就越高,因而对试件抗拉强度产生了不利影响。

由图4可知:单一纤维的掺入对基体混凝土抗拉强度有增强作用,其中纤维素纤维展现出更强的增韧阻裂能力,当掺量为 2.0 kg/m^3 时达到最优,其劈裂抗拉强度较普通混凝土提高约31.95%;掺入不同种类的纤维对抗拉强度的影响表现出了相似的变化规律,即劈裂抗拉强度均随着掺量的增大而增大。这可能是由于在一定范围内增加纤维的掺量,会使单位体积内的纤维数量增多,使其能更加均匀、广泛地分布在试块的各个界面,从而更有效地阻止裂缝的萌生和发展。

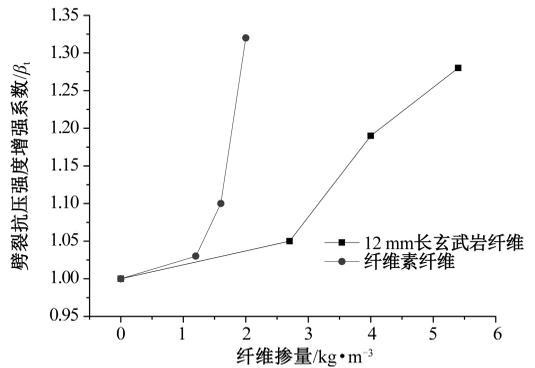


图4 单一纤维的掺量对劈裂抗拉强度增强系数的影响

Fig. 4 Effect of fiber content on compressive strength enhancement factor

2.2.3 抗折强度

混杂纤维的掺量对抗折强度增强系数的影响如图5所示。

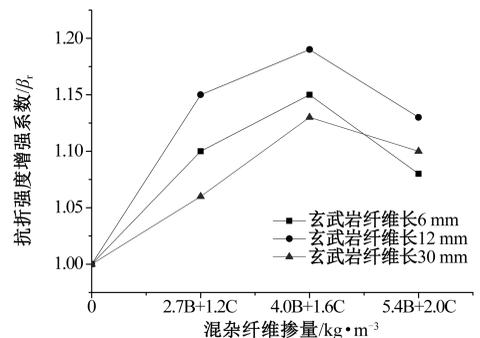


图5 混杂纤维掺量与抗折强度增强系数的关系

Fig. 5 Effect of hybrid fiber content on compressive strength enhancement factor

从图5可以看出,混杂纤维混凝土的抗折增强系数随着掺量的增大先升后降,当玄武岩纤维掺量为 2.7 kg/m^3 ,纤维素纤维掺量为 1.6 kg/m^3 时对抗折强度的增强效果最优。对比不同的玄武岩纤维长度(6 mm、12 mm、30 mm)可以发现:当纤维长为12 mm时对抗折强度的增强效果较好,且出现峰值;由图可知,混杂纤维的掺入可以在一定程度上提高混凝土试件的抗折能力,在玄武岩掺量为 $2.7\text{ kg/m}^3\sim 5.4\text{ kg/m}^3$,纤维素掺量为 $1.2\text{ kg/m}^3\sim 2.0\text{ kg/m}^3$ 的范围内,两种纤维混掺表现出了“正混杂效应”。

由图6可见,掺入玄武岩纤维、纤维素纤维均能提高试块的抗折强度:单掺纤维素纤维时抗折增强系数表现为先升后降,且纤维掺量为 1.6 kg/m^3 时达到峰值1.17;抗折强度增强系数随着玄武岩纤维

掺量的增大而逐渐变大,这可能是因为掺入玄武岩纤维可以减少由于收缩变形而引起的微裂纹,对裂缝的扩展及延伸起到了限制作用。纤维素纤维分散性较玄武岩纤维好,能够形成更为有效的三维网络结构,最大化地阻止裂缝的产生及发展,故掺入适量的纤维素纤维比玄武岩纤维可表现出更强的增韧阻裂效果。

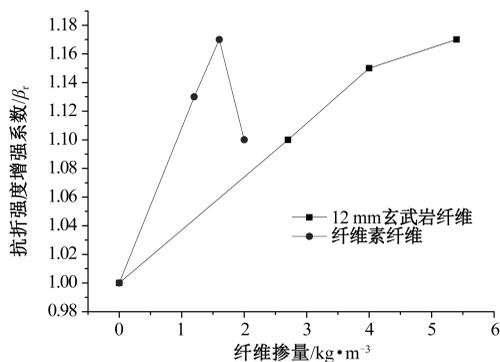


图6 单一纤维的掺量对抗折强度增强系数的影响

Fig. 6 Effect of fiber content on compressive strength enhancement factor

2.3 玄武岩-纤维素纤维混杂效应分析

由试验结果可知,不同的纤维掺量与纤维种类对混凝土力学性能的影响不尽相同,且掺配比例也对其力学性能有较大影响。玄武岩纤维有较高的抗拉强度和弹性模量,在普通混凝土中掺入玄武岩纤维能够很好地阻止贯穿裂缝的形成及延伸,在裂缝出现后,玄武岩纤维自身可以承担一部分应力,从而使裂缝的开裂时间延缓,进而提高混凝土的综合力学性能^[14]。纤维素纤维的亲水性好、握裹力强,能和水泥浆体良好地结合在一起,且其弹模较低,尺寸细小,纤维之间的平均间距小,由纤维间距理论^[15]可知,在混凝土中均匀分散着的数量巨大的细小纤维将有效阻止裂缝的延伸;从分布形态来看,纤维素纤维在混凝土中会以三维立体网格形式分布,这样的分布形式有利于降低微裂尖端的应力集中,削弱混凝土因干缩而引起的拉应力^[16],从而起到阻碍微裂缝产生与扩展的作用。

将玄武岩、纤维素两种纤维按恰当的掺配比例混杂,则可使两种纤维相互取长补短,充分发挥出各自的性能,体现出“正混杂效应”,从而改善和提高混凝土的力学性能。在纤维长度过长、纤维掺量不

合理或掺配比例不适合的情况下,纤维与水泥基体的结合处会出现更多的界面,这将使界面过渡区和有害孔隙增多^[17],导致水泥基体的强度降低,从而影响混凝土的力学性能。

3 结论

(1)将玄武岩-纤维素纤维混杂掺入混凝土中可充分发挥出各自的性能,同时能够改变混凝土的破坏形态,使其由脆性破坏转变为延性破坏,且混杂纤维混凝土试件在破坏时表面不会有明显的混凝土剥落,只产生微小裂缝;

(2)单掺玄武岩纤维和单掺纤维素纤维混凝土的各项力学性能均比普通混凝土要高,相比较而言,单掺玄武岩纤维比单掺纤维素纤维对力学性能的改善更佳,其中,立方体抗压强度在玄武岩纤维掺量为 2.7 kg/m^3 时达到最大,较基准组提高了11.06%,纤维素纤维在掺量为 1.6 kg/m^3 时抗压强度最高,较普通混凝土提高了5.29%;

(3)混杂纤维混凝土在合理的掺配比例下其各项力学性能均高于普通混凝土,当玄武岩纤维掺量为 4.0 kg/m^3 ,纤维素纤维掺量为 1.6 kg/m^3 时掺量最优,混杂纤维混凝土的抗压、抗拉、抗折强度较普通混凝土分别提高了13.94%、35.46%、18.75%。

参考文献

- [1] 李为民,许金余,沈刘军,等.玄武岩纤维混凝土的动态力学性能[J].复合材料学报,2008(2):135-142.
- [2] 徐祥伟.混杂纤维自密实混凝土力学性能及耐久性研究[D].深圳:深圳大学,2015.
- [3] 杨成蛟.混杂纤维混凝土力学性能及耐久性试验研究[D].大连:大连理工大学,2007.
- [4] Yuan H Q, Chen J T, Zhu J D. Mechanical properties of layered hybrid fiber reinforced concrete [J]. Journal of Wuhan University of Technology Mater. Sci. Ed., 2003, 18(2): 68-70.
- [5] 夏冬桃,刘向坤,夏广政.混杂纤维增强高性能混凝土弯曲韧性研究[J].华中科技大学学报:自然科学版,2013,41(6):108-112.
- [6] Ralegaonkar R, Gavali H, Aswath P, et al. Application of chopped basalt fibers in reinforced mortar: A review [J]. Construction & Building Materials, 2018, 164: 589-602.
- [7] 孙崇亮.混杂纤维混凝土基本力学性能及抗裂抗渗性研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2016.
- [8] 梅国栋,徐礼华,鲁维妙.纤维掺量对混杂纤维混凝土轴心抗拉性能的影响分析[J].武汉大学学报(工学版),2013,46(6):752-758.
- [9] Lawler J S, Zampini D, Shah S P. Microfiber and macrofiber hybrid

- fiber-reinforced concrete[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2005, 17(5): 595-604.
- [10] 贺晶晶, 师俊平, 王学志, 等. 混杂效应对混杂纤维混凝土力学性能的影响[J]. 玻璃钢/复合材料, 2016(9): 26-32.
- [11] 赵卓, 曲礼英, 马磊磊. PVA-纤维素混杂纤维混凝土的工作性能与力学性能[J]. 混凝土, 2017(10): 93-95.
- [12] 大连理工大学. 纤维混凝土试验方法标准[M]. 北京: 中国计划出版社, 2010.
- [13] 华渊, 连俊英, 周太全. 长径比对混杂纤维增强混凝土力学性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2005, 8(1): 71-76.
- [14] 孙冠东, 焦华喆, 陈新明, 等. 短切玄武岩纤维对混凝土的增强效果及机理[J]. 工业建筑, 2018(1): 118-121.
- [15] Sun W, Chen H. The effect of hybrid fibers and expansive agent on the shrinkage and permeability of high-performance concrete[J]. Cement and Concrete Research, 2001, 31(4): 595-601.
- [16] 倪建新. 常州某地下工程中纤维素纤维混凝土的质量控制措施分析[J]. 科技视界, 2014(13): 124-125.
- [17] 元成方, 高丹盈. 氮吸附法研究聚丙烯纤维混凝土高温后的孔隙结构[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2014, 42(4): 122-126.

EXPERIMENTAL STUDY ON MECHANICAL PROPERTIES OF BASALT-CELLULOSE HYBRID FIBER REINFORCED CONCRETE

ZHANG Zhen-lei

(Railway Engineering Department of Liaoning Railway Vocational and Technical Collage, Jinzhou 121000, China)

Abstract: In order to study the effect of basalt fiber and cellulose fiber mixing on the mechanical properties of concrete, the different basalt fiber lengths (6 mm, 12 mm, 30 mm) and different fiber contents (2.7 kg/m^3 , 4.0 kg/m^3 , 5.4 kg/m^3) were analyzed by cube compression, splitting tensile and flexural strength test. The results indicate that compressive strength, splitting tensile strength and flexural strength were increased after adding a reasonable content of hybrid fiber. When the content of basalt fiber and cellulose fiber is 4 kg/m^3 and 1.6 kg/m^3 , respectively, the cube compression, splitting tensile and flexural strength are increased by 13.94%, 35.46% and 18.75%, respectively, than that of the ordinary concrete. When the basalt fiber length is 12 mm and the content is 4 kg/m^3 , the fiber reinforced concrete shows a good enhancement effect. And with the increase of the content, the strength of fiber concrete increases first and then decreases. When the content of cellulose is 1.6 kg/m^3 , the effect of concrete is the best.

Key words: hybrid fiber; mechanical properties; fiber length; fiber content