

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2019.06.020

聚丙烯纤维和粗骨料对超高性能混凝土 抗拉强度的影响研究

陈倩

(武汉大学, 湖北 武汉 430072)

摘要: 向超高性能混凝土中掺入适量粗骨料,可在不降低其力学性能的前提下有效减少胶凝材料的用量,降低其成本。同时,为改善混凝土固有的抗拉强度低的缺陷,将聚丙烯纤维和钢纤维混杂掺入混凝土中可取得较好成果。考虑聚丙烯纤维体积掺量和长径比、粗骨料掺量3个因素,设计并制作了18组共54个超高性能混凝土试块,通过试验研究分析聚丙烯纤维特征参数和粗骨料掺量对含粗骨料超高性能混凝土劈裂抗拉强度的影响规律。结果表明,试验参数范围内,随着聚丙烯纤维体积掺量的增加,UHPC的劈裂抗拉强度呈现先减后增再减的规律;随着聚丙烯纤维长径比的增大,呈现先减后增的规律;聚丙烯纤维最佳配比为体积掺量0.10%,长径比167;掺入质量分数为15%的粗骨料不会降低UHPC的劈裂抗拉强度,但当粗骨料掺量提高到30%时,UHPC的劈裂抗拉强度降低明显。

关键词: 超高性能混凝土(UHPC);聚丙烯纤维;粗骨料;抗拉强度试验

中图分类号: TU528.572

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2019)06-0113-04

Effects of Polypropylene Fiber and Coarse Aggregate on Tensile Strength of Ultra High Performance Concrete

CHEN Qian

(Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China)

Abstract: The amount of cementitious materials can be effectively reduced by adding appropriate coarse aggregate into UHPC without reducing its mechanical properties. Meanwhile, in order to improve the inherent weakness of concrete in tensile strength, mixing polypropylene fiber and steel fiber into concrete can get better results. In consideration of three factors of mass fraction (0%, 15%, 30%) of coarse aggregate, aspect ratio (167, 280, 396) and volume fraction (0%, 0.05%, 0.10%, 0.15%) of polypropylene fiber, 18 batches specimens of UHPC were poured. Splitting tensile test was conducted to analyze the tensile strength of UHPC, focusing on the effect of polypropylene fiber parameters and mass fraction of coarse aggregate on the splitting tensile strength. Results of the test showed that, in the studied range, the splitting tensile strength of UHPC decreases first then increases and then decreases again with the increase in volume fraction of polypropylene fiber; with the increase in aspect ratio of polypropylene fiber, the splitting tensile strength decreases first and then increases; the optimum polypropylene fiber proportion is with an aspect ratio of 167 and a volume fraction of 0.10%; the addition of coarse aggregate with a mass fraction of 15% do not have any negative effects on the splitting tensile strength of UHPC, but when the mass fraction of coarse aggregate increases to 30%, the splitting tensile strength of UHPC decreases significantly.

Keywords: ultra high performance concrete (UHPC); polypropylene fiber; coarse aggregate; splitting tensile strength test

收稿日期:2019-08-15

修稿日期:2019-09-20

基金项目:国家自然科学基金重点项目资助(51738011)

作者简介:陈倩(1995—),女,湖北襄阳人,硕士研究生,研究方向为超高性能混凝土力学性能。E-mail: qianchen2017@163.com

超高性能混凝土(Ultra High Performance Concrete, UHPC)是一种新型水泥基复合材料,最初由法国学者 Richard 等^[1-2]在均布超细致密法(DSP)、无宏观缺陷(MDF)水泥基材料和钢纤维混凝土等研究基础上研发而来,具有强度高、耐久性好、韧性大、体积稳定性及微裂纹自愈合等众多的优良特性,使得 UHPC 结构使用寿命长、后期维护成本低、长期综合效益高。这些优异的综合性能满足现代工程结构向高耸、大跨、重载方向发展及承受恶劣环境的需要和可持续发展的要求。迄今,超高性能混凝土大致分为两类:一类是活性粉末混凝土(RPC),不含粗骨料;另一类是含粗骨料的超高性能混凝土(CA-UHPC)。由于 RPC 对原材料要求严格,制备工艺特殊,生产成本低,其推广应用受到一定的限制。相比之下,同样具有超高强度和超高耐久性的 CA-UHPC 因其原料易取、制备简单、成本较低等优势而更具竞争力,工程应用前景更加广阔。同时,为提高 UHPC 的抗拉强度、抗剪强度,增强 UHPC 的韧性、抗冲击性能,国内外专家学者分别对钢纤维、碳纤维、玻璃纤维、高分子合成纤维等两种或三种纤维混合增强 UHPC 的力学行为及结构响应进行了大量的宏观尺度试验研究和理论分析,其中,以钢-聚丙烯混杂纤维混凝土为主导,取得了比较丰富的成果。研究表明^[3-5],将聚丙烯纤维和钢纤维混杂加入混凝土后,两种纤维协同工作,纤维丝间相互空间作用得到加强,能够形成工作性能良好的空间整体,进而使 UHPC 力学性能得到一定程度的改善和提高。综上,开展聚丙烯纤维参数和粗骨料掺量对超高性能混凝土力学性能影响的研究对于推进 UHPC 的工程实践应用具有重要意义。

目前国内外关于钢纤维参数对 UHPC 力学性能影响的研究已较成熟,而关于聚丙烯纤维参数和粗骨料掺量对 UHPC 力学性能影响的研究较少。文献[6-11]在普通混凝土中加入聚丙烯纤维,通过试验研究表明,由于聚丙烯纤维弹性模量较低,在混凝土中不能起到承力骨架作用,因而单掺聚丙烯纤维对混凝土强度无明显提升作用,但聚丙烯纤维可桥接微裂纹,抑制裂纹扩展,从而增强混凝土延性。文献[3-4]将聚丙烯纤维和钢纤维混杂加入 RPC 中,研究表明,在适当掺量的条件下,钢纤维与聚丙烯纤

维混杂 RPC 的力学性能要优于单掺任何一种纤维的 RPC,更优于不掺纤维的 RPC。文献[12]采用最大粒径为 10 mm 的青石碎石作为粗骨料,配制出了抗压强度为 148 MPa 的 UHPC。文献[13]通过 CA-UHPC 抗压强度试验,指出粗骨料的最佳粒径范围为 5 mm~15 mm,胶凝材料掺量宜为 900 kg/m³。文献[14]研究得到,CA-UHPC 抗压强度随粗骨料掺量的增加呈现先增加后减小的趋势,弹性模量随粗骨料掺量增加线性增长。文献[15]研究表明,对于未掺入钢纤维的 CA-UHPC,材料的弯曲初裂强度先减小后增大。以上研究大多基于试验进行,对指导 UHPC 力学性能研究方向具有重要意义,但也有着试验数据较少、数据点较离散的问题。

本文设计了 18 组共 54 个超高性能混凝土试块,通过劈裂抗拉强度试验,系统地分析聚丙烯纤维体积掺量和长径比、粗骨料掺量 3 个参数对 UHPC 劈裂抗拉强度的影响,可为工程设计提供参考。

1 试验概况

1.1 试验设计

为分析粗骨料质量掺量和聚丙烯纤维体积掺量、长径比对 UHPC 劈裂抗拉强度的影响,本文选取粗骨料质量掺量为 0%、15%、30%,聚丙烯纤维体积掺量为 0%、0.05%、0.10%、0.15%,长径比为 167、280、396。根据规范《活性粉末混凝土》^[16](GB/T 31387—2015)和《普通混凝土配合比设计规程》^[17](JGJ 55—2011),确定了 UHPC 基准配合比,见表 1。共设计了 18 种配合比,每个配合比设计 3 个 100 mm×100 mm×100 mm 的立方体试块。各配合比主要参数见表 2。所有试块同批浇筑,在标准养护条件下养护 28 d。

1.2 试验材料

采用武汉新途工程纤维制造有限公司生产的钢纤维和聚丙烯纤维,其物理力学性能见表 3。粗骨料采用粒径为 5 mm~20 mm 的花岗岩碎石。基体混凝土材料组成为:P.052.5 级的普通硅酸盐水泥、河砂(中砂,表观密度 2.65 kg/m³,最大粒径为 5 mm)、硅粉、粉煤灰(I 级)、高效减水剂(聚羧酸系高性能减水剂,减水率 >37%)。

表 1 基准配合比

水胶比	水 /(kg·m ⁻³)	水泥 /(kg·m ⁻³)	硅灰 /(kg·m ⁻³)	粉煤灰 /(kg·m ⁻³)	中砂 /(kg·m ⁻³)	高效减水剂 /(kg·m ⁻³)
0.16	160	800	50	150	1220	30

表 2 试块主要参数

No.	编号	$V_{sf}/\%$	l_{sf}/d_{sf}	$V_{pf}/\%$	l_{pf}/d_{pf}	粗骨料掺量 / $\%$	劈裂抗拉强度 $f_{t,s}/\text{MPa}$
1	UC0P0	2.00	60	—	—	—	14.68
2	UC0PA05	2.00	60	0.05	167	—	12.83
3	UC0PA10	2.00	60	0.10	167	—	16.13
4	UC0PA15	2.00	60	0.15	167	—	14.01
5	UC0PB10	2.00	60	0.10	280	—	11.80
6	UC0PC10	2.00	60	0.10	396	—	16.23
7	UC15P0	2.00	60	—	—	15	15.20
8	UC15PA05	2.00	60	0.05	167	15	13.42
9	UC15PA10	2.00	60	0.10	167	15	17.05
10	UC15PA15	2.00	60	0.15	167	15	15.15
11	UC15PB10	2.00	60	0.10	280	15	11.49
12	UC15PC10	2.00	60	0.10	396	15	16.38
13	UC30P0	2.00	60	—	—	30	12.64
14	UC30PA05	2.00	60	0.05	167	30	12.24
15	UC30PA10	2.00	60	0.10	167	30	13.08
16	UC30PA15	2.00	60	0.15	167	30	11.32
17	UC30PB10	2.00	60	0.10	280	30	13.41
18	UC30PC10	2.00	60	0.10	396	30	12.73

注: C 表示粗骨料; PA、PB、PC 分别表示长径比为 167、280、396 的聚丙烯纤维。

表 3 纤维参数及物理力学性能

材料类型	标号	长度 /mm	直径 /mm	长径比	密度 /($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	拉伸强度 /MPa
钢纤维	SF	12	0.200	60	7.85	>2000
	PA	8	0.048	167	—	—
聚丙烯纤维	PB	14	0.048	280	0.91	>400
	PC	19	0.048	396	—	—

1.3 加载装置与加载制度

依据规范^[16]和《普通混凝土力学性能试验方法标准》^[18](GB/T 50081—2002), 劈裂抗拉强度试验在量程为 300 kN 的 SHT5605 - P 微机控制电液伺服万能试验机上进行, 加载速率为 0.09 MPa/s。

2 试验结果与分析

2.1 聚丙烯纤维体积掺量的影响

图 1 所示为聚丙烯纤维长径比为 167 的 UHPC 中, 聚丙烯纤维体积掺量 (V_{pf}) 对 UHPC 劈裂抗拉强度 ($f_{t,s}$) 的影响。由图 1 可知, 掺入体积掺量为 0.10% 的聚丙烯纤维可以提高 UHPC 的劈裂抗拉强度, 提高幅度为 3.4% ~ 12.2%, 而另两个掺量聚丙烯纤维作用为降低, 降低幅度分别为 3.2% ~ 12.6% 和 0.3% ~ 10.5%。所以按照 V_{pf} 对 $f_{t,s}$ 提高幅度排序为: 0.10% > 0.00% > 0.15% > 0.05%。

文献[6]对 RPC 的研究也得出了掺入 V_{pf} 为 0.10% 的聚丙烯纤维可以提高 $f_{t,s}$ 的结论。这是因为聚丙烯纤维的积极作用主要表现为其可以增强混凝土塑性变形能力, 增强混凝土介质连续性, 缓和试件承载产生的应力集中, 抑制混凝土早期裂缝形成及发展。然而, 另一方面, 聚丙烯纤维弹性模量较低, 具有一定弱界面效应^[19], 同时, 聚丙烯纤维具有一定的引气效果, 这也使得水泥基材料与骨料之间黏结强度有所降低。此外, 聚丙烯纤维的掺入对 UHPC 增稠作用也是不可忽略的一面, 导致 UHPC 试块难以振动密实, 对 UHPC 力学性能产生不利影响。

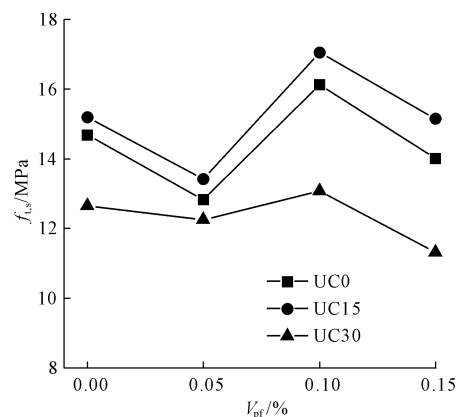


图 1 聚丙烯纤维体积掺量对 UHPC 劈裂抗拉强度的影响

2.2 聚丙烯纤维长径比的影响

图 2 所示为 V_{pf} 为 0.10% 的 UHPC 中,聚丙烯纤维长径比(l_{pf}/d_{pf})对劈裂抗拉强度的影响。由图 2 可知,对于粗骨料掺量为 0 和 15% 的 UHPC,掺入 l_{pf}/d_{pf} 为 167 和 396 的聚丙烯纤维可以提高 $f_{t,s}$,提高幅度为分别为 9.9% ~ 12.2% 和 7.8% ~ 10.6%;掺入 l_{pf}/d_{pf} 为 280 的聚丙烯纤维会降低 $f_{t,s}$,降低幅度为 19.6% ~ 24.4%。按照 l_{pf}/d_{pf} 对 $f_{t,s}$ 提高幅度排序为:167 > 0 > 396 > 280。而当粗骨料掺量为 30% 时,UHPC 的劈裂抗拉强度表现出不一样的规律,分析其原因为,较大的粗骨料掺量改变了 UHPC 的内部结构,使得聚丙烯纤维的作用明显降低,导致不同长径比的聚丙烯纤维加入 UHPC 得到的强度却大致相同。

因而可以得出对 UHPC 劈裂抗拉强度最优的聚丙烯纤维配比为 PA10。

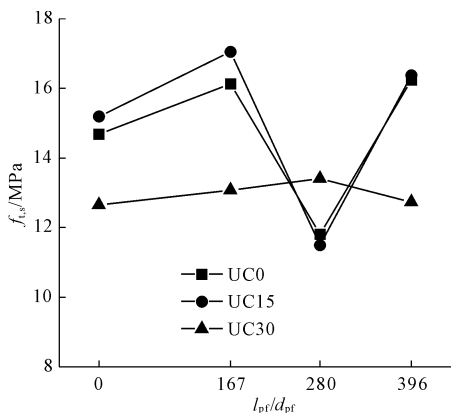


图 2 聚丙烯纤维长径比对 UHPC 劈裂抗拉强度的影响

2.3 粗骨料掺量的影响

由图 1、图 2 可知,粗骨料掺量为 15% 时,UHPC 的劈裂抗拉强度略有提高,影响不大。但当粗骨料掺量提高到 30% 时,UHPC 的劈裂抗拉强度降低明显。这是因为,粗骨料掺量较小时,UHPC 基体胶凝材料相对较多,纤维的分布更加均匀,纤维有效利用率较高,UHPC 基体与钢纤维的粘结力依然发挥了很大的作用,同时粗骨料间的咬合作用对裂缝的发展有一定的阻碍^[20],可以在一定程度上弥补粗骨料加入引起纤维利用率下降的负面效应^[14],所以当粗骨料掺量为 15% 时,UHPC 劈裂抗拉强度影响不大。当粗骨料掺量达到 30% 时,UHPC 工作性能急剧下降,纤维分布不均,钢纤维结团严重,且胶凝材料的减少导致纤维与基体间的粘结作用减小,从而使 UHPC 劈裂抗拉强度明显降低。

3 结 论

(1) 当聚丙烯纤维体积掺量从 0.00% 提高至 0.15% 时,UHPC 的劈裂抗拉强度呈现先减后增再减的规律,在 0.10% 时达到最大值,最大值高出不掺聚丙烯纤维的 UHPC 3.4% ~ 12.2%。当聚丙烯纤维长径比从 167 提高至 396 时,UHPC 的劈裂抗拉强度呈现先减后增的规律,在 167 时达到最大值,最大值高出不掺聚丙烯纤维的 UHPC 9.9% ~ 12.2%。试验参数范围内,聚丙烯纤维最佳配比为体积掺量 0.10%,长径比 167。

(2) 当粗骨料掺量从 0% 提高至 30%,UHPC 劈裂抗拉强度呈现先增后减的规律。掺入质量分数为 15% 的粗骨料不会降低 UHPC 劈裂抗拉强度。但当粗骨料掺量提高到 30% 时,UHPC 劈裂抗拉强度降低明显。

参考文献:

- [1] Richard P, Cheyrezy M. Composition of reactive powder concretes [J]. Cement & Concrete Research, 1995, 25 (7): 1501-1511.
- [2] Richard P, Cheyrezy M. Reactive powder concretes with high ductility and 200 - 800 MPa compressive strength [J]. ACI Special Publication, 1994, 144(24): 507-518.
- [3] 钟世云,王亚妹,高汉青. 纤维对自密实活性粉末混凝土强度的影响 [J]. 建筑材料学报, 2008(5): 522-527.
- [4] 杨兆鹏,毕巧巍,汪 辉. 钢纤维与聚丙烯纤维混杂活性粉末混凝土的力学性能 [J]. 工业建筑, 2010, 40 (9): 77-79.
- [5] 张海鹏,陈 猛,白 帅,等. 层布式混杂纤维混凝土抗压及抗拉性能试验研究 [J]. 水利与建筑工程学报, 2015, 13(5): 131-135.
- [6] 张建隽,赵贵哲,赵源源. 掺加不同纤维的活性粉末混凝土抗拉强度研究 [J]. 中北大学学报(自然科学版), 2016, 37(3): 318-322.
- [7] 郑文忠,李海艳,王 英. 高温后不同聚丙烯纤维掺量活性粉末混凝土力学性能试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2012, 33(9): 119-126.
- [8] Toutanji H A. Properties of polypropylene fiber reinforced silica fume expansive-cement concrete [J]. Construction & Building Materials, 1999, 13(4): 171-177.
- [9] 毕 骏,张豫川,谌文武,等. 聚丙烯纤维对混凝土力学性能影响的研究 [J]. 硅酸盐通报, 2015, 34(6): 1694-1699.
- [10] 刘数华,阎培渝. 聚丙烯纤维对高强混凝土性能的影响 [J]. 材料科学与工艺, 2008, 16(6): 885-888.

结果进行了分析。

(1) 比较了靠上游合龙、中间合龙和靠下游合龙三种方案,确定一期临时土石围堰最优合龙位置为纵向围堰中部。

(2) 针对不同来流量,论证了一期临时土石围堰在挡水期内(11月15日—次年4月15日)束窄河床满足 III 级航道的通航要求。

参考文献:

- [1] 金忠青,王玲玲,魏文礼. 三峡工程大江截流流场的数值模拟[J]. 河海大学学报,1998(1):85-89.
- [2] 戴会超,王玲玲,朱红兵. 三峡工程导截流数值实验室的建立及数值模拟(II)[J]. 长江科学院院报,2004(6):7-10.
- [3] 王光谦,杨文俊,夏军强,等. 三峡工程明渠截流水流数学模型研究及其应用 I:模型建立与率定[J]. 长江科学院院报,2005(2):1-4.
- [4] 夏军强,王光谦,杨文俊,等. 三峡工程明渠截流水流数学模型研究及其应用 II:方案计算与反演计算[J]. 长江科学院院报,2005(3):1-5.
- [5] 贺昌海,张辉辉,杨栋. 分期导流束窄河床的二维数值模拟研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版),2005(3):81-84.
- [6] 王继保,刘伟,陈和春. 宽戽堤截流二维数值模拟计算研究[J]. 三峡大学学报(自然科学版),2009,31(4):18-22.

- [7] 王晓丽,金瑞,宋成涛. 向家坝一期施工导流通航条件数值模拟研究[J]. 水运工程,2010(11):110-114.
- [8] 王青,黄细彬. 基于 Flow-3D 的陡坡弯道水流三维数值模拟[J]. 水资源与水工程学报,2016,27(5):145-149.
- [9] 贺昌海,陈辉,刘全. 基于 CATIA 建模的导流工程三维数值模拟研究[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版),2016,49(4):422-428.
- [10] 翟保林,刘亚坤. 高水头明流泄洪洞三维数值模拟[J]. 水利与建筑工程学报,2017,15(3):31-34.
- [11] 刘彬,忽彦鹏,杨磊,等. 基于 VOF 法长陡坡排水隧洞三维数值模拟[J]. 武汉大学学报(工学版),2017,50(1):43-49.
- [12] 李扬,黄荣卫,张婷. 五里亭水利枢纽施工导流期间若干问题的数值分析研究[J]. 水利与建筑工程学报,2011,9(5):113-117.
- [13] 张亮,吴吉春,施小清,等. 白鹤滩水电站右岸导流洞施工涌水数值模拟[J]. 水文地质工程地质,2013,40(6):22-27.
- [14] 贺昌海,王木涵,李亚. 分流挡渣堤体型优化研究[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版),2017,50(5):514-518.
- [15] 刘文,贺昌海,惠建伟,等. 考虑水流掺气的施工导流工程流场数值模拟[J]. 中国农村水利水电,2019(2):149-154.

(上接第 116 页)

- [11] 徐礼华,梅国栋,黄乐,等. 钢-聚丙烯混杂纤维混凝土轴心受拉应力-应变关系研究[J]. 土木工程学报,2014,47(7):35-45.
- [12] Sobuz H R, Visintin P, Ali M S M, et al. Manufacturing ultra-high performance concrete utilising conventional materials and production methods[J]. Construction & Building Materials, 2016,111:251-261.
- [13] 朋改非,杨娟,高育欣,等. 含粗骨料的超高性能混凝土抗压强度的影响因素[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版),2012,33(6):5-9.
- [14] 黄政宇,李仕根. 含粗骨料超高性能混凝土力学性能研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2018,45(3):47-54.
- [15] 程鹏,吴方红,曾彦钦,等. 含粗骨料的超高性能混

- 凝土受弯试验研究[J]. 水利与建筑工程学报,2019,17(2):41-45.
- [16] 活性粉末混凝土:GB/T 31387—2015[S]. 北京:中国标准出版社,2015.
- [17] 普通混凝土配合比设计规程:JGJ 55—2011[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2011.
- [18] 普通混凝土力学性能试验方法标准:GB/T 50081—2002[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2002.
- [19] 徐礼华,夏冬桃,夏广政,等. 钢纤维和聚丙烯纤维对高强混凝土强度的影响[J]. 武汉理工大学学报,2007(4):58-60.
- [20] 易伟建,王昱,邓清. 骨料粒径对无腹筋梁抗弯性能影响的试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2014,41(11):1-7.