doi:10.11988/ckyyb.20180748 2020,37(1):149-155

含白云石粗骨料超高性能混凝土的性能试验研究

王永霞
(内蒙古交通职业技术学院 道路桥梁工程系,内蒙古 赤峰 024005)

摘 要:为了降低超高性能混凝土(UHPC)中水泥等胶凝材料的用量,掺入白云石粗骨料(CDA),制备了含CDA的UHPC,并探讨了粗骨料含量和钢纤维体积掺量对UHPC抗压强度、弯曲强度、弹性模量、单轴拉伸性能以及耐磨性能的影响。结果表明:随着CDA含量的增加,UHPC弹性模量的显著提升,而抗压强度和弯曲强度则先上升后下降;钢纤维体积掺量的增加,增大了含CDA的UHPC的抗压强度、初裂强度、峰值强度和断裂耗能,降低了试件历经磨损后的质量损失和磨损深度,优化了其单轴拉伸性能和耐磨性能;当CDA含量为200 kg/m^3、钢纤维体积掺量为1.5%时,制备的UHPC各项性能综合最佳。研究成果可供超高性能混凝土研究人员参考。

关键词:超高性能混凝土;白云石粗骨料;单轴拉伸性能;钢纤维;耐磨性能
中图分类号:TU528 **文献标志码**:A
文章编号:1001-5485(2020)01-0149-07

Properties of Ultra-high Performance Concrete Containing Coarse Dolomite Aggregate

WANG Yong-xia
(Road and Bridge Engineering Department, Inner Mongolia Vocational and Technical College, Chifeng 024005, China)

Abstract: In order to reduce the amount of cementitious materials in ultra-high performance concrete (UHPC), we prepared UHPC specimens containing coarse dolomite aggregate (CDA) and investigated the effects of CDA content and steel fiber volume on compressive strength, flexural strength, elastic modulus, uniaxial tensile property and abrasion resistance of UHPC. Results revealed that with the increase of CDA dosage, the elastic modulus improved significantly, the compressive and flexural strength of UHPC increased firstly but then decreased. On the one hand, as the volume of steel fiber increased, the uniaxial tensile property of UHPC were enhanced, wherein improving the compressive strength, first cracking strength, post cracking strength and energy absorption capacity of UHPC. On the other hand, the mass loss and depth of abrasion reduced with the increase of steel fiber content which represents the optimization of abrasion resistance of UHPC. When the dosage of CDA was 200 kg/m^3 and the volume of steel fiber was 1.5%, the comprehensive performances of UHPC reached the optimum.

Key words: ultra-high performance concrete; coarse dolomite aggregate; uniaxial tensile performance; steel fiber; abrasion resistance

1 研究背景

超高性能混凝土(Ultra-high performance concrete,UHPC)是一种性能优异的水泥基复合材料,具有强度高、耐久性好及韧性优良等特点,在道路修复、高层建筑、桥梁工程以及核工程建筑等领域中应用广泛[1-4]。当前,为了降低生产能耗、减小水泥等传统建筑材料的用量、节约成本并抑制UHPC早期收缩,进一步深化UHPC的工程应用,采用复掺矿

收稿日期:2018-07-17;**修回日期**:2018-09-20
基金项目:内蒙古自治区自然科学基金项目(2014MS0528)
作者简介:王永霞(1982-),女,蒙古族,内蒙古通辽人,讲师,硕士研究生,主要从事道路工程材料研究工作。E-mail:ncwy518@sina.com

物掺合料(硅粉、粉煤灰、矿粉等)并添加粗骨料来制备 UHPC 的相关研究受到愈来愈多的关注[5-7]。研究显示,含一定掺量的玄武岩碎石等粗骨料的 UHPC 在抗裂能力、体积稳定性、刚度和服役周期等方面表现优异[8-11]。如 Yang 等[11]通过引入粗骨料制备了具有良好流动性、抗渗性和低收缩率的 UHPC,其 56 d 抗压强度达到 150 MPa。然而,关于白云石碎石骨料对 UHPC 强度及韧性的报道却不多见,因此本文着重考察了含白云石粗骨料(Coarse dolomite aggregate,CDA)的 UHPC 的力学性能。此外,虽然大量的研究表明钢纤维在 UHPC 力学性能的提升方面起到关键作用[12-16],但对一定粗骨料含量下,钢纤维体积掺量对 UHPC 耐磨性能影响的探讨稍显不足。

为此,本文首先通过复掺矿物掺合料增大浆体流动性,在低水胶比条件下制备了含粗骨料的 UHPC,并在含白云石骨料 UHPC 力学性能的研究基础上,进一步探讨了钢纤维体积掺量对含 CDA 的 UHPC 抗压强度、单轴拉伸性能和耐磨损性能的影响,以期为促进含 CDA 的 UHPC 的应用研究提供理论支撑。

2 原材料与试验方法

2.1 原材料

采用强度等级为 P·O 52.5 的普通硅酸盐水泥;采用的矿物掺合料分别为硅灰、粉煤灰和超细矿粉,其比表面积分别为 18 500,427,800 m^2/kg,胶凝材料的化学组成如表 1 所示。细骨料为天然河砂,细度模数为 2.6;粗骨料为 5~10 mm 的白云石粗骨料,压碎值为 8%;钢纤维(Steel Fiber,SF)采用镀铜钢纤维,抗拉强度为 2.85 GPa,长度为 20 mm,直径为 0.20 mm;采用聚羧酸高效减水剂,减水率>35%。

2.2 试验方案

首先探讨了不同 CDA 掺量(0,200,300,400,500 kg/m^3)对超高性能混凝土抗压强度、弯曲强度和弹性模量的影响;其次,进一步分析了钢纤维体积掺量(0.5%,1.0%,1.5%,2.0%)对含 CDA 的 UHPC 单轴拉伸性能和耐磨性能的影响,并将其与玄武岩碎石粗骨料制备的 UHPC 性能进行了对比。所制备的 UHPC 的水胶比为 0.18,其中减水剂掺量为 2%(减水剂与胶凝材料质量之比),其他材料质量比为 $m_{水泥}$: $m_{硅灰}$: $m_{粉煤灰}$: $m_{超细矿粉}$: $m_{砂子}$ = 1 : 0.25 : 0.10 : 0.20 : 1.10。

2.3 试验过程及测试方法

2.3.1 UHPC 制备

将一定比例的水泥、硅灰、粉煤灰和超细矿粉倒入强制式混凝土搅拌机中干拌 2 min,然后加入 CDA 和砂子继续搅拌 1 min,在搅拌机低速转动下依次加入水和减水剂,并继续搅拌 6 min,最后将钢纤维均匀拌入,再搅拌 5 min 至均匀状态,即得含 CDA 的 UHPC 拌合物。参照《水泥胶砂流动度的测定方法》(GB/T 2419—2005)[17]测试浆体坍落度。而后于模具中浇筑成型,并辅以 50 Hz/s 的振动频率振动密实 30 s,试件覆膜并于室温下养护 48 h 后脱模,再于标准养护室中养护至规定测试龄期。

2.3.2 测试方法

(1)力学性能测试。采用《活性粉末混凝土》(GB/T 31387—2015)[18]测试 UHPC 的抗压强度和弹性模量,试件规格为 100 mm×100 mm×100 mm(长×宽×高),加载速率为 1.2~1.4 MPa/s。采用液压万能力学试验机开展 UHPC 四点弯曲试验,试件规格为 100 mm×100 mm×400 mm(长×宽×高)的棱柱体,加载速率为 0.1 MPa/s。采用 CMT 4304 微机电子万能试验机进行单轴拉伸性能测试,试件规格为哑铃型,长 270 mm,高 30 mm,中部测试区域长 70 mm,宽 30 mm,位移加载速率 0.03 mm/min,采用初裂强度、峰值强度和断裂能来评价 UHPC 单轴拉伸性能,计算公式为:

$$f_{cr} = F_{cr}/A \quad ; \tag{1}$$

$$f_{max} = F_{max}/A \quad ; \tag{2}$$

$$T = \int_0^{\varepsilon} \sigma \mathrm{d}\varepsilon \quad 。 \tag{3}$$

式中:f_{cr} 为初裂强度(MPa);F_{cr} 为初裂荷载(N);A 为试件受拉横截面积(mm^2);f_{max} 为峰值强度

表 1 胶凝材料的化学组成

Table 1 Chemical composition of cementitious materials %

胶凝材料种类	SiO_2	Al_2O_3	CaO	Fe_2O_3	MgO	SO_3	Na_2O	K_2O	烧失量
水泥	20.35	4.20	66.01	3.52	1.28	3.03	0.22	0.31	1.06
硅灰	93.91	0.71	0.44	0.15	—	0.78	—	—	3.98
粉煤灰	53.73	34.59	2.94	5.18	0.66	0.18	0.60	0.45	1.58
矿粉	30.77	15.29	38.13	9.97	3.08	0.92	0.11	0.65	1.08

(MPa)；F_{max} 为裂后峰值荷载(N)；T 为断裂耗能(MPa)；σ 为拉伸应力(MPa)；ε 为拉伸应变(%)。

(2)耐磨损性能测试。参照 ASTM(American Society of Testing Materials) C944 标准,采用旋转式摩擦测试,通过测试试件的磨损深度和磨损质量 2 个指标来评价 UHPC 的耐磨损性能。

3　结果与分析

3.1　CDA 含量对 UHPC 力学性能的影响

表 2 为钢纤维体积掺量为 1.0%时,白云石粗骨料含量对超高性能混凝土抗压强度、弯曲强度和弹性模量影响的试验结果设定 CDA 含量为 0 的 UHPC 为对照组。从表 2 可知,UHPC 抗压强度随粗骨料含量的增加呈现先增大后降低的趋势。当粗骨料含量为 200 kg/m^3 时,UHPC 的抗压强度为 154.1 MPa,比未掺杂粗骨料的 UHPC 提高了 4.4%。但继续增加粗骨料含量时,UHPC 的抗压强度增幅逐渐降低,直至为负增长。如粗骨料含量为 500 kg/m^3 时,UHPC 的抗压强度比对照组降低了 3.4%。说明粗骨料含量需要控制在一定范围内,否则会对 UHPC 抗压强度产生负面影响。

表 2　CDA 超高性能混凝土的力学性能

Table 2　Mechanical properties of UHPC with CDA

CDA 含量/(kg·m^{-3})	抗压强度		弯曲强度		弹性模量	
	试验值/MPa	提高率/%	试验值/MPa	提高率/%	试验值/GPa	提高率/%
0	147.6	—	17.8	—	42.3	—
200	154.1	4.4	18.2	2.2	45.2	6.9
300	150.7	2.1	15.4	−13.5	45.4	7.3
400	153.4	3.9	15.1	−15.2	45.7	8.0
500	142.6	−3.4	14.5	−18.5	44.8	5.9

CDA 本身的抗压强度较高,一定掺量的粗骨料在混凝土内部形成刚性骨架,骨料之间相互咬合,从而提升了 UHPC 的整体抗压性能。而高掺量下对 UHPC 抗压强度产生负面影响的原因则在于粗骨料含量过大降低了浆体的工作流动性能,且增大了粗骨料-胶凝材料(基体)之间的界面过渡区(薄弱区)面积,界面性能弱化占据主导地位进而削弱了骨料的咬合作用,造成抗压强度的降低。

试验中还发现当粗骨料含量增加到 500 kg/m^3 时,UHPC 的坍落度由 260 mm 降低至 115 mm,降低了 55.8%,浆体的流动性能急剧降低。粗骨料含量过大会增大 UHPC 浆体拌合物中钢纤维的集聚现象,使纤维分散性变差,进一步造成 UHPC 体系的密实度降低,内部缺陷累积增多,因而抗压性能整体有所降低。

从表 2 中 UHPC 的弯曲强度变化规律来看,CDA 掺量<200 kg/m^3,对弯曲强度的影响不大;当掺量继续增大时,弯曲强度则明显下降。粗骨料含量由 0 变为 500 kg/m^3 时,UHPC 的弯曲强度由 17.8 MPa 降低为 14.5 MPa,降低了 18.5%。一方面,粗骨料碎石的脆性较高,其掺量提高增大了材料的整体脆性,导致弯曲韧性变差;另一方面,Liu 等[15]研究表明粗骨料含量的增加会降低钢纤维的利用率并减小钢纤维与基体之间的界面粘结力。粗骨料含量的增加,破坏了基体中纤维的连续分布,降低了浆体的流动能力,钢纤维间容易集聚成团,致使分散性能变差,纤维利用效率下降(如图 1)。两方面的综合作用降低了 UHPC 的弯曲性能。需要说明的是当粗骨料含量较低时,UHPC 中胶凝材料相对含量更多,此时以钢纤维与水泥基体之间的粘结力为主导,钢纤维依然能够有效发挥增强增韧的作用,在一定程度上补强了由粗骨料脆性及薄弱界面区面积增大带来的纤维利用效率降低所引起的负面效应,低掺量骨料之间的咬合作用也可阻碍裂缝发展。故此,当粗骨料含量<200 kg/m^3,对 UHPC 弯曲强度的影响不大。

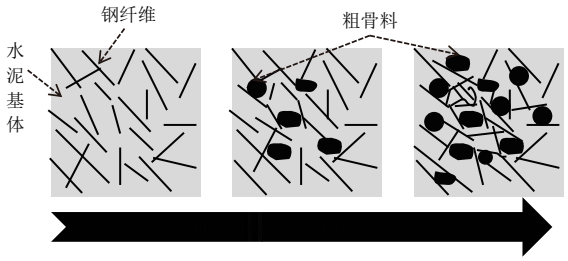


图 1　CDA 影响钢纤维分散性能示意图

Fig. 1　Schematic diagram of CDA affecting dispersion of steel fiber in UHPC

另外,由表 2 还可知,随粗骨料含量的增加,UHPC 的弹性模量逐渐增大,这与其抗压强度和弯曲强度的变化规律不同。粗骨料含量为 200 kg/m^3 时,UHPC 的弹性模量为 45.2 GPa,比对照组提高了 6.9%。这是因为 CDA 本身的刚度大,模量高,其掺量越大,受力时的形变值越小,弹性模量则越高。尽管粗骨料含量的增多会导致界面薄弱区面积的增大,但是弹性模量的测定和计算是在试件受力的线弹性变形阶段,此时界面过渡区的影响较小,故而粗骨料含量的增加对弹性模量的负面影响不明显。但掺量过大时,界面过渡区的影响会逐渐增大,进而影响到 UHPC 的弹性模量,如粗骨料含量从 400 kg/m^3 增加到 500 kg/m^3,其弹性模量的增幅从 8.0%降低到 5.9%。

3.2 钢纤维体积掺量对含 CDA 的 UHPC 抗压强度的影响

由上文的分析可知,当粗骨料含量为 200 kg/m^3 时,UHPC 的综合力学性能最优。因此,下文中固定 CDA 含量为 200 kg/m^3,探讨钢纤维体积掺量对 UHPC 力学性能的影响,并设置了 1.5%钢纤维体积掺量下含玄武岩碎石粗骨料(Coarse basalt aggregates, CBA)作为对照组。不同钢纤维体积掺量下含 CDA 或 CBA 超高性能混凝土的抗压强度如表 3 所示。

表 3 不同钢纤维体积掺量下含 CDA 或 CBA 的超高性能混凝土的抗压强度

Table 3 Compressive strength of UHPC containing CDA or CBA with varied steel fiber content

粗骨料类型	CDA 或 CBA 含量/(kg·m^{-3})	钢纤维体积掺量/%	不同龄期抗压强度/MPa		
			7 d	28 d	56 d
白云石碎石(CDA)	200	0.5	125.5	143.1	148.3
	200	1.0	132.6	154.1	156.2
	200	1.5	137.2	155.9	163.2
	200	2.0	139.1	160.3	174.0
玄武岩碎石(CBA)	200	1.5	116.4	129.8	134.5

从表 3 可以看出:

(1)随养护龄期的延长,UHPC 的抗压强度稳定增长。

(2)UHPC 抗压强度随着钢纤维体积掺量的增加而增加。当钢纤维体积掺量从 0.5%增大到 2.0%时,56 d 养护龄期下 UHPC 试件的抗压强度从 148.3 MPa 增大到 174.0 MPa,增大了 17.3%。当钢纤维体积掺量为 1.5%时,含 CDA 的 UHPC 抗压强度(56 d)为 163.2 MPa,比同等龄期下含玄武岩粗骨料的 UHPC 的 134.5 MPa 提升了 21.3%。

普通混凝土受压破坏后,试件整体呈散碎状态,而 UHPC 由于掺入了钢纤维,基体与钢纤维之间的粘结力阻碍了裂缝的发展,基体中乱向分布的钢纤维纵横交错约束了立方体试件受压时的形变,大大改善了 UHPC 的抗压强度。

3.3 钢纤维体积掺量对含 CDA 的 UHPC 单轴拉伸性能的影响

图 2 是钢纤维体积掺量为 1.5%时,含 CDA 的 UHPC(简称 CDA-UHPC)试件拉伸断裂的典型示意图。试件呈韧性断裂,表现为典型的应变硬化特征,拉断后试件表面存在许多肉眼可见的细小密集裂纹。在 UHPC 中掺入的钢纤维散乱分布在基体中,由于钢纤维本身的拉伸强度高、形变能力好,且与基体之间存在机械咬合等黏着力,在水泥基体产生裂缝时,钢纤维能够发挥协同作用,一方面锚固桥接阻碍裂纹发展(如图 3 所示);另一方面承受载荷,缓解破坏,提高混凝土的延性。



图 2 典型的 CDA-UHPC 单轴拉伸断裂试件

Fig. 2 Typical uniaxial tensile fracture specimen of UHPC

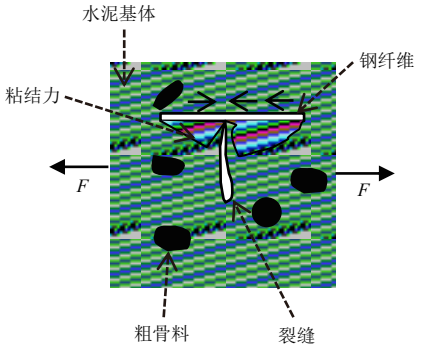


图 3 UHPC 中钢纤维阻裂增韧模型示意图

Fig. 3 Schematic diagram of cracking and toughening model with steel fiber in UHPC

对于具有应变硬化特性的 UHPC 来说,其试件在断裂时,对应的应力-应变曲线可分为 3 个阶段:

(1)弹性变形阶段。应力与应变呈正比,钢纤维与混凝土基体共同受力。

(2)应变硬化阶段。混凝土基体产生裂缝并退出工作后,荷载依靠 UHPC 中的钢纤维与基体之间的粘结作用来承担,直至达到应力峰值。

(3)屈服断裂阶段。裂缝进一步扩展,载荷下降,钢纤维被拔出,至试件断裂为止。试件在破坏时所消耗的能量,即为应力-应变曲线所围成的面积,面积的大小反映了 UHPC 拉伸断裂韧性的高低。

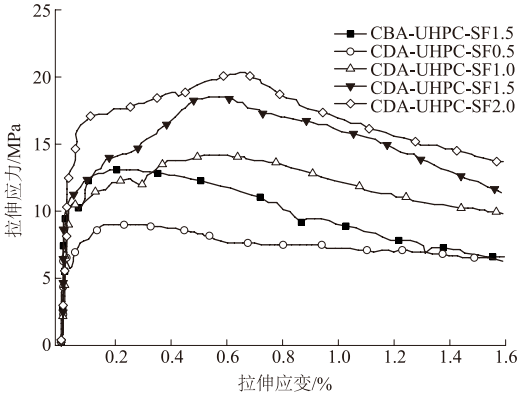
图 4 和图 5 给出了不同钢纤维体积掺量下的 CDA-UHPC 和含玄武岩碎石骨料 UHPC(简称 CBA-UHPC)试件单轴拉伸时应力-应变曲线以及对应的断裂强度和断裂能。

从图 4 和图 5 可见:

(1)钢纤维体积掺量为 1.5%时,CBA-UHPC 和 CDA-UHPC 试样在拉伸过程中均表现出应变硬化特征。

(2)CDA-UHPC-SF1.5 的初裂强度、峰值强度及断裂能分别为 11.28 MPa、18.71 MPa 和 23.93 N/m,比 CBA-UHPC-SF1.5 试样的这 3 项指标分别增加了 5.5%, 27.5%, 51.1%。即同等钢纤维用量下,含 CDA 的 UHPC 拉伸性能较优。

(3)钢纤维体积掺量的增加,应力-应变曲线所包覆的面积逐渐增大,说明 UHPC 的拉伸性能得到



注:CBA-UHPC-SF1.5 编号表示含玄武岩碎石粗骨料且钢纤维体积掺量为 1.5%的 UHPC;CDA-UHPC-SF0.5 编号表示含白云石碎石粗骨料且钢纤维体积掺量为 0.5%的 UHPC;其余编号依次表示钢纤维的掺量分别为 1.0%,1.5%和 2.0%。

图 4　UHPC 单轴拉伸的应力-应变曲线

Fig. 4　Uniaxial tensile stress-strain curves of UHPC with varied volume of steel fiber

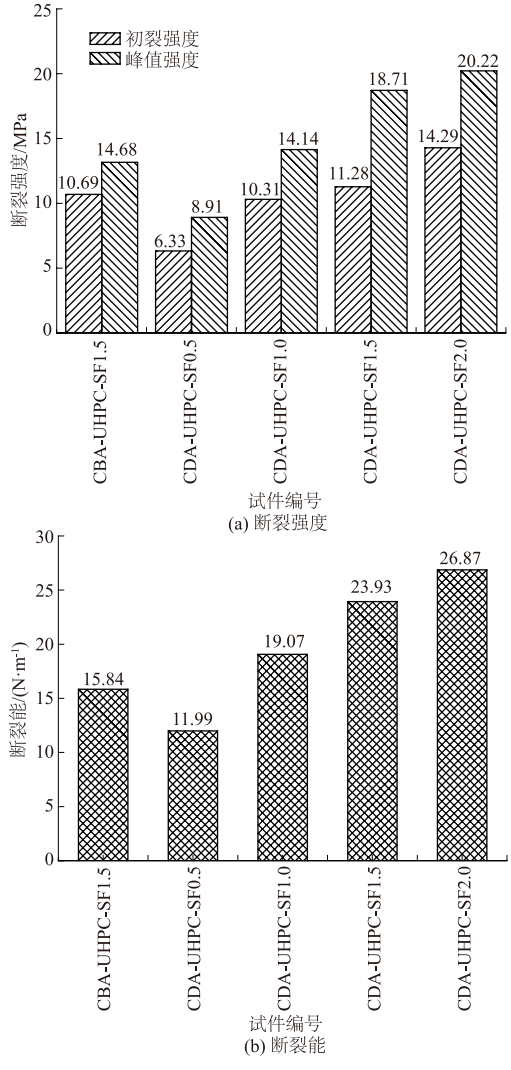


图 5　钢纤维体积掺量对 UHPC 拉伸断裂韧性的影响

Fig. 5　Effect of volume of steel fiber on tensile fracture toughness of UHPC

有效优化。当钢纤维体积掺量为 2.0%时,CDA-UHPC 的初裂强度为 14.29 MPa、峰值强度为 20.22 MPa、断裂耗能为 26.87 N/m,相较于 0.5%的钢纤维体积掺量分别提高了 125.8%,126.95%,124.1%。

(4)不同钢纤维体积掺量下 UHPC 试件的线弹性变形阶段基本一致,相比较而言,钢纤维体积掺量对 UHPC 韧性的优化主要体现在应变硬化阶段,即试件裂缝进一步扩展时,较高掺量的钢纤维优势凸显,发挥锚固桥接作用阻止裂纹发展,并承担了由混凝土基体传递过来的应力,使之重新分布。综上可见,含 CDA 且钢纤维体积掺量为 2%时,UHPC 的单轴拉伸性能最优。

3.4　钢纤维体积掺量对含 CDA 的 UHPC 耐磨性能的影响

不同钢纤维体积掺量下 UHPC 耐磨性能的测试结果如图 6 所示。由图 6 可知,随着磨损时间的延长,UHPC 磨损质量和深度持续增大。钢纤维体积掺量的增加降低了 UHPC 历经磨损后的质量损失,减小了磨损深度。当钢纤维体积掺量为 2.0%时,UHPC 磨损后的质量损失为 3.25 g,磨损深度为 0.29 mm,较之钢纤维体积掺量为 0.5%时这 2 项指标分别降低了 32.7%,35.6%,表明掺入钢纤维后,UHPC 的耐磨性能有了显著改善。UHPC 本质上是钢纤维与掺合料混杂的水泥基复合材料,在磨损过程中,其耐磨性能的改善与组成材料的本身性能有关,更与钢纤维-基体界面性能有关。钢纤维的阻裂增韧效应改善了 UHPC 的力学性能,更有利于优化 UHPC 的耐磨性能。

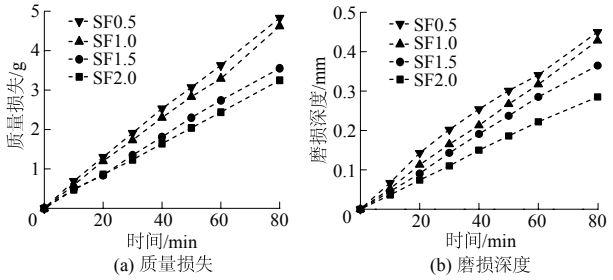


图 6　钢纤维体积掺量对 CDA-UHPC 耐磨性能的影响

Fig. 6　Effect of steel fiber content on abrasion resistance of CDA-UHPC

通过拟合 UHPC 抗压强度、峰值强度与其质量损失之间的关系,得到了抗压强度及峰值强度与 UHPC 磨损质量损失拟合关系曲线,如图 7 所示。

质量损失与抗压强度的拟合方程为

$$y = -0.068x_1 + 14.91,\quad R^2 = 0.841 \quad 。\ (4)$$

式中:y 为质量损失;x_1 为抗压强度。

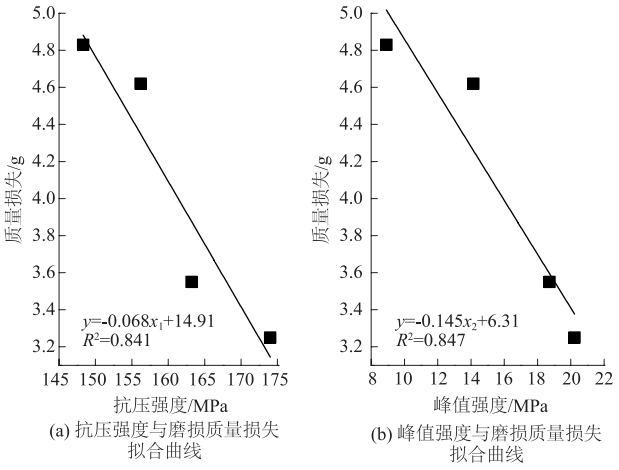


图 7 抗压强度及峰值强度与 UHPC 磨损质量损失拟合关系曲线

Fig. 7 Relation of mass loss of UHPC against compressive strength and post cracking strength

质量损失与峰值强度之间的拟合方程为

$$y = -0.145x_2 + 6.31,\quad R^2 = 0.847 \quad 。 \quad (5)$$

式中 x_2 为峰值强度。

拟合结果表明 UHPC 的强度与其质量损失呈现显著的负相关关系,即 UHPC 的抗压强度、峰值强度与其耐磨性能呈正相关关系。结果表明,UHPC 强度越大,耐磨性能越高。

UHPC 的磨损本质上是微小断裂过程的累积,基本遵循表面形成裂纹-扩展-失稳-碎屑脱离基体这一过程。钢纤维乱向分布在混凝土中,相互搭接牵连,当摩擦受力方向与钢纤维分布方向相同时,由于钢纤维本身比较光滑,摩擦系数也低于混凝土,导致整体的摩擦系数降低,提高了其耐磨性;当受力方向与钢纤维分布一致时,钢纤维本身的抗拉强度达到 2 850 MPa,相比而言,不易磨损断裂;在历经磨损产生裂纹时,相互搭接的钢纤维传递应力,并减缓破坏处的应力集中,裂纹的扩展得到有效延缓,多方因素共同作用提高了 UHPC 的耐磨性能。

4 结 论

(1)当 CDA 含量<200 kg/m^3 时,增加其含量对 UHPC 的抗压强度、弯曲强度和弹性模量具有一定的增强效果,但由于粗骨料的掺杂会降低钢纤维的分散性,继续增大 CDA 含量将对 UHPC 的抗压强度和弯曲强度产生不利影响。

(2)含 CDA 的 UHPC 力学性能优于含 CBA 的 UHPC。钢纤维体积掺量的增加显著提高了 CDA-UHPC 抗压强度,改善了单轴拉伸强度和韧性,且钢纤维对 UHPC 断裂韧性的优化主要体现在应变硬化阶段。当钢纤维体积掺量为 2%时,CDA-UHPC 抗压强度、初裂强度、峰值强度和断裂耗能比 0.5%钢纤维体积掺量时分别提升了 17.3%,125.8%,126.95%,124.1%,各项性能最优。

(3)UHPC 强度和断裂韧性与其历经磨损后的质量损失呈负相关关系,表明钢纤维的掺入带来的增韧阻裂效应提高了 UHPC 的耐磨性能。

参考文献:

[1] JONES T, CATHER B. Ultra-high Performance Fibre-reinforced Concrete[J]. Concrete Engineering International, 2005, 9(6): 1216-1221.

[2] 梁兴文, 胡翱翔, 于 婧,等. 钢纤维对超高性能混凝土抗弯力学性能的影响[J]. 复合材料学报, 2018, 35(3):722-731.

[3] YOO D Y, YOON Y S. A Review on Structural Behavior, Design, and Application of Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete[J]. International Journal of Concrete Structures & Materials, 2016, 10(2): 125-142.

[4] 鲁 亚, 朱 杰, 王江帆,等. 含粗骨料 UHPC 在路面修复工程中的应用研究[J]. 交通科技, 2018(1): 5-7,11.

[5] WILLE K, BOISVERT-COTULIO C. Material Efficiency in the Design of Ultra-high Performance Concrete[J]. Construction & Building Materials, 2015, 86: 33-43.

[6] MO A, EL-TAWIL S. Effects of Variations in the Mix Constituents of Ultra high Performance Concrete (UHPC) on Cost and Performance[J]. Materials & Structures, 2016, 49(10): 4185-4200.

[7] 徐立斌, 董 艺, 陈尚伟. 超高性能混凝土的配合比设计研究[J]. 混凝土, 2015(1):72-74.

[8] WANG C, YANG C, LIU F, *et al.* Preparation of Ultra-High Performance Concrete with Common Technology and Materials[J]. Cement & Concrete Composites, 2004, 26(8): 538-544.

[9] AYDIN S, YAZICI H, YARDIMCI M Y, *et al.* Effect of Aggregate Type on Mechanical Properties of Reactive Powder Concrete[J]. ACI Materials Journal, 2010, 107(5): 441-449.

[10] 冯 浩. 超高性能混凝土早期塑性收缩开裂的研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2014.

[11] YANG J, PENG G F, GAO Y X, *et al.* Mechanical Properties and Durability of Ultra-High Performance Concrete Incorporating Coarse Aggregate[J]. Key Engineering Materials, 2014, 629-630: 96-103.

[12] HANNAWI K, BIAN H, PRINCE-AGBODJAN W,

et al. Effect of Different Types of Fibers on the Microstructure and the Mechanical Behavior of Ultra-High Performance Fiber-Reinforced Concretes[J]. Composites Part B Engineering, 2016, 86: 214-220.

[13] 张丽辉, 刘建忠, 刘加平,等. 磷酸锌改性钢纤维对 UHPC 单轴拉伸性能的影响[J]. 混凝土, 2016(9): 52-55.

[14] 高绪明. 钢纤维对超高性能混凝土性能影响的研究[D]. 长沙:湖南大学, 2013.

[15] LIU J, HAN F, CUI G, *et al*. Combined Effect of Coarse Aggregate and Fiber on Tensile Behavior of Ultra-high Performance Concrete[J]. Construction & Building Materials, 2016, 121: 310-318.

[16] 张亚坤,侯黎黎. 纤维混凝土在水利工程中的应用[J]. 长江科学院院报, 2012, 29(10):114-117.

[17] GB/T 2419—2005,水泥胶砂流动度的测定方法[S]. 北京:中国标准出版社,2005.

[18] GB/T 31387—2015,活性粉末混凝土[S]. 北京:中国标准出版社,2015.

(编辑:王　慰)

(上接第 141 页)

[2] 葛修润, 卢应发. 循环荷载作用下岩石疲劳破坏和不可逆变形问题的探讨[J]. 岩土工程学报, 1992, 14(3):56-60.

[3] 葛修润, 蒋　宇, 卢允德, 等. 周期荷载作用下岩石疲劳变形特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(10):1581-1585.

[4] 章清叙, 葛修润, 黄　铭, 等. 周期荷载作用下红砂岩三轴疲劳变形特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(3):473-478.

[5] ZIMMELS Y, KIRZHNER F, KRASOVITSKI B. Design Criteria for Compressed Air Storage in Hard Rock[J]. Energy and Environment, 2002, 13(6): 851-872.

[6] 夏才初, 张平阳, 周舒威,等. 大规模压气储能洞室稳定性和洞周应变分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(5): 1391-1398.

[7] 莫海鸿. 岩石的循环试验及本构关系的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1988, 7(3): 215-224.

[8] DEHLER W, LABUZ J F. Stress Path Testing of an Anisotropic Sandstone[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2007, 133(1): 116-119.

[9] 张　媛, 许　江, 杨红伟,等. 循环荷载作用下围压对砂岩滞回环演化规律的影响[J]. 岩石力学与工程学报,2011, 30(2):320-326.

[10] 刘树新, 刘长武, 韩小刚, 等. 基于损伤多重分形特征的岩石强度 Weibull 参数研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(11): 1786-1791.

[11] 王者超, 赵建纲, 李术才, 等. 循环荷载作用下花岗岩疲劳力学性质及其本构模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(9): 1888-1900.

[12] 谢和平. 岩石、混凝土损伤力学[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1990.

[13] STAGG K G, ZIENKIEWICZ O C. 工程实用岩石力学[M]. 成都地质学院工程地质教研室,译. 北京:地质出版社,1978.

[14] 张平阳,夏才初,周舒威,等. 循环加-卸载岩石本构模型研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(12): 3354-3359.

[15] 李西蒙,刘长有,SPENG S,等. 单轴分级循环加载条件下砂岩疲劳变形特性与损伤模型研究[J]. 中国矿业大学学报,2017,46(1):8-16.

[16] 曹文贵,方祖烈, 唐学军. 岩石损伤软化统计本构模型之研究[J]. 岩石力学与工程学报,1998,17(6): 628-633.

[17] 曹文贵,张　升. 基于 Mohr-Coulomb 准则的岩石损伤统计分析方法研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2005,32(1):43-47.

[18] 邓华锋,胡　玉,李建林,等. 循环加卸载过程中砂岩能量耗散演化规律[J]. 岩石力学与工程学报,2016, 35(增刊 1):2869-2875.

(编辑:刘运飞)

欢迎关注《长江科学院院报》微信公众号