

工程水泥基复合材料的配合比优化

林文伟* 李群杰 游学敏

暨南大学力学与建筑工程学院

DOI:10.12238/btr.v3i11.3519

[摘要] 主要研究了纤维掺量、粉煤灰掺量和水胶比对水泥基工程复合材料(ECC)力学性能的影响。通过设计不同纤维直径与掺量的配合比、设计不同粉煤灰掺量、不同水胶比的配比研究了ECC试样的抗折强度与抗压强度。研究表明,使用纤维直径40 μm 的聚乙烯醇纤维,且体积掺量为1.5%时,ECC具有最佳的抗折、抗压强度,分别为14.0MPa和63.0MPa;粉煤灰掺量为20%时,ECC达到较好的力学性能,抗折抗压强度分别为16.3MPa和70.6MPa;水胶比为0.25时,ECC的抗折抗压强度分别为15.9MPa和62.5MPa;得到优化的ECC配比为纤维体积掺量1.5%、40 μm 直径的聚乙烯醇纤维、20%粉煤灰掺量以及0.25的水胶比。

[关键词] 纤维增韧水泥基复合材料; 聚乙烯醇纤维; 力学性能; 配合比优化

中图分类号: TV42+1 **文献标识码:** A

Optimization of mix ratio of engineering cement matrix composites

Wenwei Lin* Qunjie Li Xuemin you

Faculty of Mechanics and Architectural Engineering, Jinan University

[Abstract] The effects of fiber content, fly ash content and water binder ratio on the mechanical properties of engineering cementitious composites (ECC) were studied. The flexural strength and compressive strength of ECC samples were studied by designing the mix proportion of different fiber diameter and content, different fly ash content and different water binder ratio. The results show that when PVA fiber with fiber diameter of 40 μm is used, and the volume content is 1.5%, ECC has the best flexural strength and compressive strength, which are 14.0mpa and 63.0mpa respectively; when the content of fly ash is 20%, ECC has better mechanical properties, which are 16.3mpa and 70.6mpa respectively. When the water binder ratio is 0.25, the flexural compressive strength of ECC is 15.9mpa and 62.5mpa respectively; the optimal ECC ratio is 1.5% of fiber volume, 40 μm diameter polyvinyl alcohol fiber, 20% of fly ash and 0.25 of water binder ratio.

[Keyword] Engineering Cementitious Composites; Polyvinyl alcohol fiber; Mechanical properties; Mix proportion optimization.

介绍

工程水泥基复合材料(ECC)最早由美国密立根大学Victor C. Li教授团队在90年代初提出关于该材料的设计理论,以微观力学和断裂力学为基本原理。ECC是一种以水泥、砂、水、矿物掺合料、高强高弹模纤维作增韧材料以及化学外加剂构成的水泥复合材料,具有应变-硬化和多重稳定开裂特征的高延性水泥基复合材料^[1]。最早,ECC的增韧材料使用聚乙烯纤维(PE),称为PE-ECC,但聚乙烯纤维价格昂贵,不能广泛应用于工程,具

有一定的局限性。而后来,高强高弹聚乙烯醇纤维(PVA)才开始应用,称为PVA-ECC。PVA材料亲水,且在水泥基体中能与纤维表面的金属阳离子形成金属氧化物,具有极强的化学粘结力,又因其成本是等体积PE纤维的1/8,于是PVA纤维逐渐取代了PE纤维,并以此研发出性能优良的PVA-ECC材料。

当前,ECC材料主要应用领域为水坝的维修加固^[2]、用于桥面板的修复^[3]以及韧性连接板等。从经济的角度看,我国已经能大量生产性能优良的PVA纤

维,单位体积的ECC材料比普通混凝土的成本要高2-3倍,但由于ECC材料具有应变硬化、高延性、与多缝开裂的特征,阻止了外界物质的入侵,削弱了腐蚀作用,使ECC的结构使用寿命提高了2倍以上,并且减少了在其使用年限内的维修次数,从而减少了人工与材料的消耗,并增加了安全性。所以从长远看,ECC材料比普通混凝土具有更高的经济效益。

ECC材料的应变硬化是由多裂缝开裂的特性体现,所以其又称为“准应变硬化”特性。素混凝土是脆性材料,在拉应

力作用下,构件的薄弱处开始出现裂缝,初始裂缝出现后,便随着应力增大而快速发展,即为单缝开裂。而ECC在初始裂缝生成后,进入塑性变形阶段,其应变硬化的过程随着微裂缝的不断生成而发展,最终应变超过5%,表现出极大的韧性和塑性变形能力。得益于纤维材料的加入,除了抗拉性能,ECC材料的抗压强度也有略微提高,因为基体受轴向压力作用时,试件同时存在着侧向的形变,而纤维的桥联作用,阻碍了这种侧向的变形,也限制了裂缝的宽度,直至裂缝中连接裂缝两端的纤维断裂或者拔出,ECC才真正发生断裂。但往往纤维的分散程度并不理想,其分散程度即受纤维直径,也受纤维的掺量影响。掺量较大时,容易成束成团分布在水泥基体中,形成大量的孔隙,给裂缝的发展提供孕床^[4]。

纤维对于水泥基材料虽有极佳的增韧增强效果,但同时也存在着不良影响,譬如纤维的种类。对于纤维的评价主要是根据其表面的粗糙程度以及长径比,纤维表面越粗糙,与水泥基体咬合越紧,在发生断裂,极有可能随着水泥基体一同断裂而非拔出;纤维的长径比越大,纤维越细,掺入水泥浆体后会极大地提高需水量,而且纤维的分散也是一个难题,良好分散的纤维对水泥基材料有极大的改性增强效果,但分散不良则在基体中形成大量孔洞,降低力学性能。所以,纤维的种类以及掺量是需要进行探究的问题。另外,粉煤灰大颗粒主要为球状玻璃微珠,对于水泥浆体有一定的增加工作性的效果,而国外的研究发现,粉煤灰的掺入能提高ECC材料的多裂缝开裂特性,也能改善新拌ECC浆体的工作性;水胶比主要影响的是浆体的工作性和力学性能,一般而言,水泥浆体的水胶比越小,抗压性能越高,但对于ECC来说,水胶比越小反而导致多裂缝开裂特性减弱,使试样延性下降。基于此,优化的ECC材料配合比需要被系统地研究,包括纤维的种类和掺量、粉煤灰掺量以及水胶比。

1 材料与试验

ECC材料的制备首先要合理选材,使用改良制备方法获得。基本要求包

含:①不含粗骨料,细骨料则需要过筛,颗粒直径不可过大。改善内部结构均匀性,减少材料内部缺陷,防止纤维与粗骨料难以粘结形成薄弱面。②纤维加入时水泥基体需要有一定的塑性粘度,易于纤维均匀分散。③装模前需充分拌匀,应一次性装模,并具有充足的振捣时间。④温度22℃,湿度95%的标准养护条件(GB/T50081-2002)。

1.1 材料

采用珠江水泥有限公司生产的金羊牌P. II 42.5R水泥,广州江南混凝土站提供的II级粉煤灰,其化学组成如表1所示。细骨料采用普通河沙,细度模数2.6,过0.6mm方孔筛,级配如表2所示。减水剂采用广州西卡建筑材料有限公司生产的Viscocrete3301-40型聚羧酸高性能减水剂,含固量40%。聚乙烯醇纤维(PVA):采用日本KURALON K-II-12,直径分别为31μm与40μm。力学性能参数如表3所示。

1.2 配合比

研究纤维直径与掺量对ECC力学性能影响的配合比设计如表4所示,其中,水泥与粉煤灰用量不变,质量比为3:2,水胶比固定为0.42;分别使用直径为31μm以及40μm的PVA纤维,掺量分别为1.0%与1.5%。F0-0为不掺纤维的空白对照。

研究粉煤灰掺量对ECC力学性能影响的配比设计如表5-表6所示。固定除粉煤灰以外的变量,分别研究在掺有直径为31μm与40μm的纤维时,粉煤灰掺量改变对ECC力学性能影响。制备40mm×40mm×160mm的标准胶砂试样×9,分别测3d,7d,28d的抗折强度与抗压强度,取3个试块的试验数据平均值。

研究水胶比对ECC力学性能影响的配比设计如表7-表8所示。控制除水胶比以外的变量不变,对纤维直径为31μm与40μm,分别设置研究水胶比改变对ECC力学性能影响的试验组别,制备成40mm×40mm×160mm的试块×9,分别测3d,7d,28d的抗折强度与抗压强度,取3个试块的试验数据平均值。

1.3 试验方法

ECC材料的制备参考Victor Li^[5]的方法,并经过多次制备试验优化后,使用

以下步骤:(1)将所有胶凝材料(水泥和粉煤灰),砂子,混合后慢速干拌1min。(2)将自来水与称好的减水剂混合,拌匀后,加入90%混合后溶液,慢速搅拌1min后,再快速搅拌2min。(3)纤维在慢速搅拌1min时逐渐加入,后快速搅拌3min,使纤维在水泥基体中分散均匀。在完成搅拌后,采用一次性装模方法,因分层装模会造成试样中性面内纤维分布不连续,严重影响试样的力学性能。新拌ECC装模后,在混凝土震动台上振捣1min,使用的模具为水泥胶砂三联模具,规格为40mm×40mm×160mm。

制备40mm×40mm×160mm的标准胶砂试样,先进行抗折试验,使用水泥抗折试验机DKZ-6000测试三个试样,取平均值;将折断后的试块使用配有40mm×40mm水泥胶砂抗压夹具的NYL-300指针式水泥压力机进行抗压试验,取折断后试件两边的抗压强度均值作为该试块的抗压强度,测试三个试样后计算平均值。

2 试验结果与分析

2.1 纤维直径与掺量对ECC力学性能的影响研究

试验所测得各组抗折、抗压强度如表9、表10所示。根据表格数据对比可知,纤维直径40μm,掺量为1.5%时有最高的抗折强度,为14.0MPa,其抗压强度也接近最高值,为63.0MPa,仅仅比最高值低0.8MPa。与对照组F0-0对比可得,加入31μm的纤维会使ECC材料的抗压强度有所降低,其中,掺入体积掺量为1.5%的F31-1.5组降低的幅度达到40%,同时,该组的抗折强度较对照组较低,所以该组ECC的力学性能是比普通的水泥胶砂要差。而掺入体积掺量为1.0%的F31-1.0组抗压强度接近对照组,抗折强度有略微的增强。原因为该组纤维材料在搅拌过程中难以分散均匀,使纤维在ECC内成团成束分布,相当于形成大量的蜂窝式孔洞,提高了试件的孔隙率,使内部出现应力集中,从而降低了试件的抗压强度。纤维的成团成束分布使纤维与基体的粘结强度有所下降,导致桥联作用减弱,抗拔出力下降,从而试件的抗折强度比普通的水泥胶砂要低。

表1 水泥与粉煤灰的化学组成

	化学组成/wt%						
	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	I. L
水泥	20.13	63.88	4.53	4.11	1.35	2.28	2.82
粉煤灰	56.05	5.90	21.42	5.92	2.61	0.9	4.52

注: I. L 是燃烧损耗

表2 河砂的级配

砂的筛分结果							
筛孔尺寸(mm)	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	
累计筛余(%)	3.2	15.3	26.5	45.3	85.4	95.3	

表3 PVA 纤维的力学性能参数

纤维直径(μm)	纤维长度(mm)	长径比	杨氏模量(MPa)	抗拉强度(MPa)	耐碱性(%)	线密度(g/cm ³)
31	12	387.1	>380	1400-1600	98-100	0.91
40	12	300.0	>380	1600-1800	98-100	1.31

表4 研究纤维直径、掺量影响的配合比设计

编号	水泥(g)	粉煤灰(g)	细骨料(g)	水(g)	纤维直径(μm)	减水剂(g)	纤维体积掺量(%)
F0-0	660	440	440	275	---	2	0
F31-1.5	660	440	440	275	31	8	1.5
F31-1.0	660	440	440	275	31	8	1.0
F40-1.5	660	440	440	275	40	6	1.5
F40-1.0	660	440	440	275	40	4.5	1.0

表5 掺有直径31μm纤维的不同粉煤灰掺量ECC的配比

编号	水泥(g)	粉煤灰(g)	细骨料(g)	水(g)	纤维直径(μm)	减水剂(g)	纤维体积掺量(%)
FA31-0	1100	0	440	275	31	4	1.5
FA31-20	880	220	440	275	31	4	1.5
FA31-40	660	440	440	275	31	4	1.5
FA31-50	550	550	440	275	31	3.5	1.5
FA31-60	440	660	440	275	31	3.5	1.5

表6 掺有直径40μm纤维的不同粉煤灰掺量ECC的配比

编号	水泥(g)	粉煤灰(g)	细骨料(g)	水(g)	纤维直径(μm)	减水剂(g)	纤维体积掺量(%)
FA40-0	1100	0	440	275	40	4	1.5
FA40-20	880	220	440	275	40	4	1.5
FA40-40	660	440	440	275	40	4	1.5
FA40-50	550	550	440	275	40	3.5	1.5
FA40-60	440	660	440	275	40	3.5	1.5

表7 掺有直径31μm纤维的不同水胶比ECC的配比

编号	水泥(g)	粉煤灰(g)	细骨料(g)	水(g)	纤维直径(μm)	减水剂(g)	纤维体积掺量(%)
W31-0.35	660	440	440	385	31	0	1.5
W31-0.32	660	440	440	350	31	0	1.5
W31-0.28	660	440	440	308	31	1.7	1.5
W31-0.25	660	440	440	275	31	4.0	1.5

表8 掺有直径40μm纤维的不同水胶比ECC的配比

编号	水泥(g)	粉煤灰(g)	细骨料(g)	水(g)	纤维直径(μm)	减水剂(g)	纤维体积掺量(%)
W40-0.35	660	440	440	385	40	0	1.5
W40-0.32	660	440	440	350	40	0	1.5
W40-0.28	660	440	440	308	40	1.7	1.5
W40-0.25	660	440	440	275	40	4.0	1.5

表9 不同纤维掺量、直径的ECC抗折强度

编号	F0-0	F31-1.5	F31-1.0	F40-1.5	F40-1.0
28d 抗折强度(MPa)	11.0	9.9	11.8	14.0	12.8

表10 不同纤维掺量、直径的ECC抗压强度

编号	F0-0	F31-1.5	F31-1.0	F40-1.5	F40-1.0
28d 抗压强度(MPa)	55.8	33.3	54.0	63.0	63.8

掺入40μm纤维的试样,抗压强度与抗折强度比空白组以及掺有31μm的试样有一定程度的提高。在抗折试验中,当试件中开始产生裂缝后,纤维的桥联作用限制了裂缝的宽度在100μm以内,而随着荷载的增大,而初始裂缝宽度又被限制,所以只能发展新的裂缝,体现出ECC材料多缝开裂的模式,提高了抗折强度。另外,抗压强度的提高主要是因为由于纤维的连接作用使基体在单轴压缩的过程中不能发生脆性断裂,约束了试件的横向变形,所以测得的抗压强度会比普通水泥砂浆要高。并且试验结束时,能观察到试件的受压面只有较大的压缩变形和产生多条微裂缝,并没有明显的基体剥落与破碎。

所以,在本组试验中,可以得到在相同粉煤灰掺量,水胶比,砂率,同种类的减水剂的条件下,掺入40μm的纤维较31μm的能得到性能较为优良的ECC材料,其中纤维掺量为1.5%所得的ECC材料力学性能更好,且能明显的表征初ECC多裂缝开裂现象。



10mm×40mm×160mm薄板试件(a)



图1 ECC弯曲时多裂缝开裂现象(b)

混凝土结构在初次开裂后, 承载能力迅速降低, 所以在一般结构设计中, 假定混凝土开裂后就不能承载拉应力。与之相比, 由于纤维的桥联作用, PVA-ECC表现出良好的裂后强度和韧性。如果裂后强度 σ_{pc} 小于初裂强度 σ_{cc} , 那只会形成单裂缝, 即素混凝土的破坏模式, 而由于桥接裂缝的纤维被拔出, 使裂纹尖端的应力松弛, 从而减缓了裂纹的扩展。对于纤维混凝土, 其韧性的改善受纤维掺量和纤维抗拔出力的强烈影响, 而抗拔出力则受纤维的形状或表面构造等因素影响, 包括纤维直径, 表面的摩擦等。纤维拔出的吸收能 G_c 可按式1计算。

$$G_c = \frac{1}{2} V_f \cdot g \cdot \tau \cdot \frac{L_f^2}{d_f} \quad (1)$$

式中, V_f 为纤维体积掺量, L_f 为纤维长度, d_f 为纤维直径, g 、 τ 是界面参数。于是, g 、 τ 不变时, ECC材料的韧性, 即纤维拔出的吸收能与纤维体积掺量, 纤维长度二次方成正比, 与纤维直径成反比。另一方面, 在素混凝土当中掺入任何纤维都会降低其工作性, 工作性的损失与纤维的体积掺量成正比。本文在ECC材料的试制过程中曾出现如下情况, 水胶比为0.25的一组配比试验, 不掺纤维, 其搅拌时的浆体流动性恰好符合要求, 而加入纤维后, 就会大大的降低浆体的流动性, 直到浆体过于稳定使搅拌浆卡住。所以, 维勃稠度相较于坍落度更适合评价ECC拌合物的工作性, 长径比越大, 韧性提高越大, 但工作性下降越严重, 所以这就需要从两者折中。一般的, 纤维的体积掺量宜在2%以下, 长径比不宜大于100^[6]。

2. 2粉煤灰掺量对ECC力学性能的影响研究

试验所测得掺有直径31 μ m、40 μ m纤维的不同粉煤灰掺量的ECC的抗折, 抗压强度分别如图2-图3所示。分析可得, 对于掺有31 μ m PVA纤维的ECC材料, 随着粉煤灰掺量的增加, 抗折强度与抗压强度在掺量为50%时达到峰值, 分别为10.8MPa和44.4MPa(28D), 但该强度对比不掺粉煤灰的对照组仍有所下降, 不

掺粉煤灰的对照组28D抗折强度为11.2MPa, 抗压强度为47.1MPa。对于掺有40 μ m PVA纤维的试样, 相较于31 μ m呈现更明显的递减趋势, 随着粉煤灰掺量的增加, ECC的力学性能不断下降, 虽在粉煤灰掺量50%时有略微提高, 但该强度仍低于20%的掺量, 更是远低于抗折与抗压强度分别为17.5MPa和78.1MPa的对照组。从龄期上看, 无论是掺有31 μ m或40 μ m PVA的试样均随着龄期增长力学性能有所提高, 与水泥混凝土相同。据此, 若要获得最佳性能ECC材料, 不应掺入粉煤灰。而从经济效益上考虑, 掺有50%粉煤灰的ECC在保证节约成本的同时, 还能得到较好的力学性能。

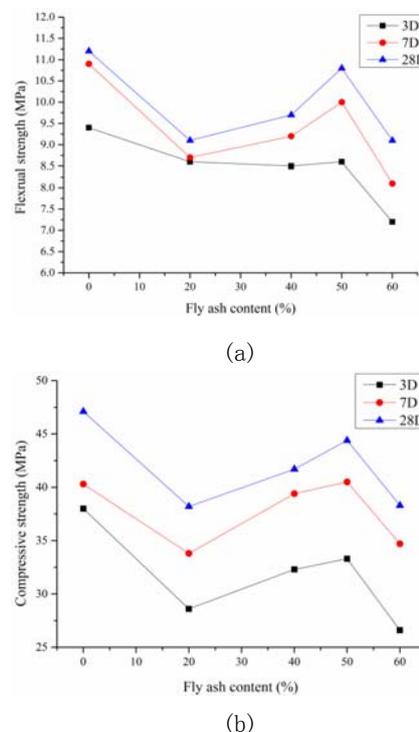


图2 掺有直径31 μ m纤维的不同粉煤灰掺量的ECC抗折强度(a)和抗压强度(b)折线图

ECC在粉煤灰掺量为50%获得较好性能的原因, 可能为31 μ m组的试验由于纤维长径比较大, 在搅拌时分布不均, 而粉煤灰的掺入会改变ECC新拌物的塑性粘度^[7], 影响纤维加入后的分散程度, 不掺或少掺粉煤灰时, 由于纤维与水泥间的化学粘结过强, 导致试件中的纤维容易发生断裂而不是拔出。况且, 31 μ m直径的纤维的抗拉强度较40 μ m的要低。但随着

粉煤灰掺量的增大, 纤维与基体的粘结力下降, 纤维更易于拔出, 即能起到较好的桥联作用, 从而达到增韧效果。

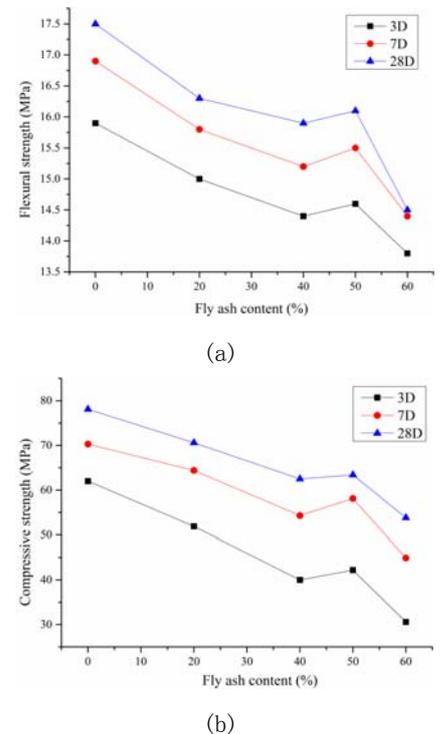


图3 掺有直径40 μ m纤维的不同粉煤灰掺量的ECC抗折强度(a)和抗压强度(b)折线图

粉煤灰加入后, ECC的强度主要取决于水泥的水化和粉煤灰的火山灰效应, 由于参与水化的水泥熟料减少, 粉煤灰的活性要低于水泥, 其火山灰效应作用过程相对缓慢, 相当于粉煤灰在早期只充当填充物, 使基体较为均匀饱满, 所以基体的水化程度有所下降, 导致ECC材料早期的强度降低。此外, 对于亲水性的PVA纤维, 纤维与基体的粘结力太强, 纤维发生断裂而不是拔出。而纤维与基体间的化学粘结主要由水泥中的Ca⁺等金属阳离子所控制, 粉煤灰中的金属阳离子多为化合态, 掺入后使得基体中游离的金属离子减少, 削弱了PVA纤维与基体的化学粘结, 使纤维更容易发生脱粘与拔出^[8], 增强了多裂缝开裂效果。所以粉煤灰少量的掺入无论是对性能, 或是经济效益上均有正面作用, 掺入胶凝材料20%的粉煤灰既能得到较好力学性能的ECC, 也具有较好的经济效益。

2. 3水胶比对ECC力学性能的影响研究

试验所测得抗折强度、抗压强度分别如图4、图5所示。折线图4表明,掺有31 μ mPVA纤维的ECC材料随着水胶比提高,抗折抗压强度在水胶比为0.25时达到峰值,分别为9.7MPa和41.7MPa;而水胶比为0.32时也达到了相近的强度,抗折抗压强度分别为9.5MPa和39.0MPa;在水胶比为0.35时达到最小值,分别为7.9MPa和34.6MPa。力学性能有所起伏的原因可能为31 μ m纤维分散性不良,在不同组的试样搅拌时难以保证纤维的分散程度完全相同,这也是纤维长径比过大时的弊端。

折线图5表明,掺有40 μ mPVA纤维的ECC材料随着水胶比增大,抗折抗压强度均呈下降趋势。在水胶比为0.25时达到试样的抗折强度和抗压强度峰值,分别为15.9MPa和62.5MPa,在水胶比为0.35时力学性能最差,抗折抗压强度分别为13.9MPa和48.8MPa。相比于掺有31 μ m纤维的折线图,水胶比与力学性能呈现明显的负相关,侧面说明了40 μ m直径的PVA纤维在同样工作性的水泥浆体中具有更好的分散性。

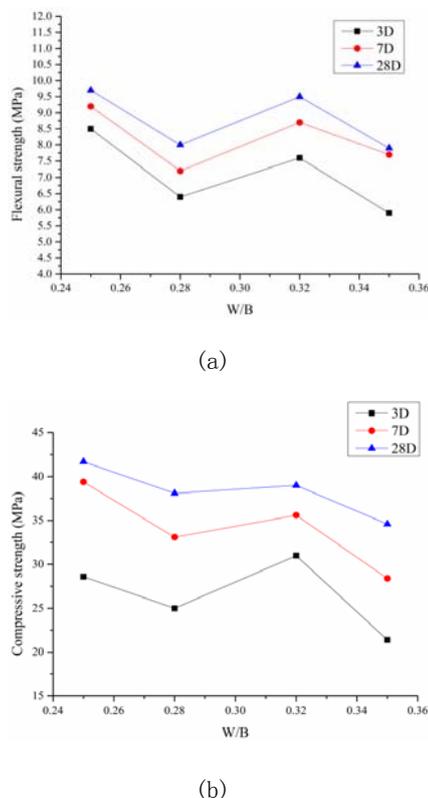


图4 掺有直径31 μ m纤维的不同水胶比的ECC抗折强度(a)和抗压强度(b)折线图

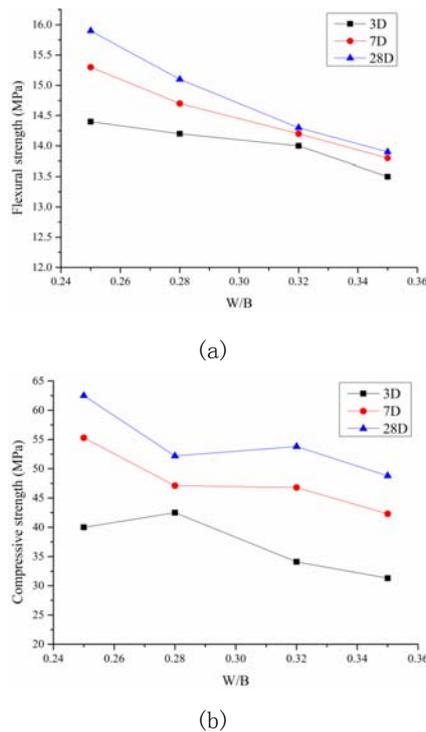


图5 掺有直径40 μ m纤维的不同水胶比的ECC抗折强度(a)和抗压强度(b)折线图

水胶比主要影响新拌ECC材料的工作性,由于PVA纤维在水中更易发生团聚,所以当水泥浆体中水含量越大,发生团聚的概率越大。纤维团聚后,每根独立的纤维间均具有极强的吸附能力,其中穿插的孔隙会把水泥颗粒及细骨料颗粒吸附,形成黏度极大的“水泥面团”,更易于发生离析、泌水现象。之所以在制备ECC时要将水与减水剂分两次加入,即是为了减少浆体中水的含量,并使新拌浆体具有能够充分分散每根纤维的塑形粘度。另一方面,当水胶比降低,新拌浆体工作性不良时,加入纤维变得毫无意义。因为水泥胶砂在水胶比极低的情况下,本身成型后即具有更高的抗压抗折强度,这时纤维在强度高水泥基体中,更倾向于与基体一同断裂而非拔出,无法起到桥联作用。甚至,水胶比过低会导致加入纤维后浆体黏度过大而无法搅拌,难以成型。综上,水胶比应取合适的范围,既能让纤维充分分散,试样良好成型,又不至于离析泌水,加快纤维团聚,所以要得到更高的力学性能,在掺入40 μ m纤维的前提下,0.25水胶比是最佳的选择。

3 结论

(1)掺入40 μ m纤维相同配合比的ECC材料在抗压强度,抗折强度都要优于31 μ m。其中,在1.5%和1.0%的纤维体积掺量时,抗压强度分别增高89.1%、18.2%,抗折强度分别提高了41.4%、8.47%。

(2)随着ECC配比中粉煤灰掺量增大,抗压、抗折强度均下降,不掺入粉煤灰时达到最佳抗折抗压强度,分别为17.5MPa和78.1MPa。而粉煤灰掺量50%时,既能达到较好的力学性能,也具有更高经济效益。

(3)水胶比主要影响纤维在新拌水泥浆体中的分散性,随着水胶比提高,ECC的抗折抗压强度均下降,在水胶比为0.25时,掺入40 μ mPVA纤维的ECC达到抗折抗压强度为15.9MPa和62.5MPa。

(4)ECC优化的配比为1.5%体积掺量的直径40 μ mPVA纤维,20%粉煤灰掺量以及0.25的水胶比。可以在满足工作性的前提下,获得更高的力学性能和经济效益。

[参考文献]

[1]丁一,陈小兵,李荣.ECC材料的研究进展与应用[J].建筑结构,2007,37(4):94-98.
 [2]郭喜春,张亮.浅谈ECC材料的性能研究与应用[J].科技信息,2012,(4):458-459.
 [3]郭磊磊,张玉娥,邱晓光.PVA_ECC材料性能研究及应用[J].河南城建学院学报,2010,19(1):46-48.
 [4]徐世焯,蔡向荣,张英华.超高韧性水泥基复合材料单轴受压应力-应变全曲线试验测定与分析[J].土木工程学报,2009,42(11):79-85.
 [5]Jian Zhou, Shunzhi Qian, Victor C Li. Improved fiber distribution and mechanical properties of engineered cementitious composites by adjusting the mixing sequence[J].Cement & Concrete Composites,2012,34:342-348.
 [6]王晓刚,赵铁军.优化设计水泥基复合材料应变硬化性能研究[J].混凝土与水泥制品,2006,(3):46-49.
 [7]杨英姿,祝瑜,高小建,等.掺粉煤灰PVA纤维增强水泥基复合材料的试验研究[J].青岛理工大学学报,2009,30(4):51-54.
 [8]李伟.超高韧性水泥基复合材料的搅拌方法研究[D].大连理工大学,2009.