

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2021.02.029

不同纤维及掺量对混凝土的强度影响规律分析

黄雪林¹, 罗东志¹, 徐习宝², 朱磊³, 谢飞⁴, 沈才华⁴, 王森⁴

(1. 宿迁市高速铁路建设发展有限公司, 江苏 宿迁 223800;

2. 中交第二公路工程局有限公司, 陕西 西安 710000;

3. 中交南京交通工程管理有限公司, 江苏 南京 211800;

4. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210024)

摘要: 为研究不同纤维与混凝土基质的协同变形作用, 针对单掺 PVA 纤维、单掺 UPE 纤维以及两者混合掺入 3 类情况的试样不同龄期不同掺量的强度特性进行了试验分析, 研究显示: UPE 纤维与混凝土的结合性比 PVA 纤维好, 但难分散, 试样的离散性较大; 混合纤维 (UPE 和 PVA 纤维体积掺量 1:1) 混凝土比较经济, 综合力学性能也最高, 其抗折强度最佳掺量为 0.4%, 此时抗折强度为 6.6 MPa, 提高率为 24.1%; 抗压强度达 49 MPa, 提高率为 8%; 折压比为 0.135, 提升 14.4%。

关键词: UPE 纤维; PVA 纤维; 抗压强度; 抗折强度; 折压强度比

中图分类号: TU528

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2021)02—0166—06

Influence Law Analysis of Different Fibers and Admixtures on Concrete Strength

HUANG Xuelin¹, LUO Dongzhi¹, XU Xibao², ZHU Lei³, XIE Fei⁴, SHEN Caihua⁴, WANG Sen⁴

(1. Suqian High-speed Railway Construction Development Co., Ltd., Suqian, Jiangsu 223800, China;

2. CCCC Second Highway Engineering Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710000, China;

3. CCCC Nanjing Traffic Engineering Management Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu 211800, China;

4. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering,

Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210024)

Abstract: In order to analyze the synergistic deformation effect of different fibers and concrete matrix, the strength of various concrete mixed with PVA fiber, UPE fiber and both fibers (3 situations) at different ages and with different contents are tested. The results as follows. UPE fiber and concrete have better adhesion than PVA fiber, but it is difficult to disperse, and the dispersion of the sample is large; Mixed fiber (The ratio of volume content of UPE fiber to PVA fiber is 1:1) concrete is more economical and has the highest comprehensive mechanical properties. The optimal fiber content with best flexural strength is 0.4%. At this time, the flexural strength is 6.6 MPa, the increase rate is 24.1%; the compressive strength is 49 MPa, the increasing rate is 8%; ratio of bending-compressive strength is 0.135, an increase of 14.4%.

Keywords: UPE fiber; PVA fiber; compressive strength; flexural strength; ratio of bending-compressive strength

由于纤维混凝土中的纤维具有延缓微裂缝扩展和跨越裂缝承受拉应力的作用, 使得纤维混凝土的抗拉强度、变形能力、断裂能和耐久性能显著提高, 因此纤维混凝土作为一种高强度、高韧性混凝土在

工程中应用越来越普遍^[1-6]。在整个纤维混凝土家族中, 经微观力学设计的纤维增强水泥基复合材料 (Engineered Cementitious Composite, ECC) 以高延性著名^[7], 国内统称为超高韧性混凝土 (Ultra-high

toughness Concrete)^[8]。其中有机纤维(聚乙烯纤维、聚丙烯纤维、聚乙烯醇纤维、尼龙纤维、聚酯纤维等合成纤维和天然植物纤维等)具有轻质、耐腐蚀、便宜等优点,逐渐成为研究的热点。江世永等^[9]利用正交试验分析方法,以粉煤灰掺量比、水胶比和聚乙烯醇(PVA)纤维掺量为变量因素,根据高韧性纤维混凝土极限强度和弯曲韧性的影响规律,指出影响程度主次顺序为:PVA 纤维掺量、粉煤灰掺量比、水胶比;当粉煤灰掺量比在 1.2,PVA 纤维掺量在 2%,水胶比不高于 0.27 时,材料表现出较好的弯曲韧性。于明鑫等^[10]采用改性聚丙烯(PP)纤维,优化传统 PVA 纤维水泥基材料(PVA ECC)配合比,其中 PP 纤维体积掺量分别为 1.0%、1.5%、2.0% 三种,制作超强韧性混凝土(PP ECC),研究指出 PP 纤维能够提高钢筋与水泥基材料的极限黏结强度,提高极限黏结强度所对应的滑移值。王义超等^[11]采用 12 mm 短切超高分子量聚乙烯纤维作为增强材料,研制了以水泥砂浆为基体的超高延性水泥基复合材料,研究显示聚乙烯纤维超高的裂缝桥接能力,大大增加了复合材料的韧性,拉伸峰值强度处的平均拉伸应变达到 12%,最大拉伸应变达到 13% 以上,具有超高的拉伸延性。虽然目前普遍研究显示了纤维的增韧增强效果,但由于有机散纤维的改性效果与纤维的长度、数量以及和基质的黏结性等众多因素有关,甚至搅拌工艺也会影响散纤维在混凝土内部的分布状态,从而影响纤维混凝土的质量^[12-13],因此目前纤维增强效果的作用机理还不是很清楚,工程应用还是依托试验分析进行纤维配比的优化必选为主。本文对 PVA 纤维、超高分子聚乙烯(UPE)纤维以及两种纤维混合 3 类情况进行了试验研究,分析了不同纤维不同配比下纤维混凝土的强度变化规律,为纤维作用机理研究提供了参考,并为工程应用提供了指导。

1 试验概况

1.1 试样的制作

试样原材料包括:水泥、石子、砂、水、减水剂、纤维。石子,5 mm~20 mm 的连续级配,含泥量 1.9%,不大于 3%,符合制作 C35-C55 混凝土的要求。水,南京地区自来水。减水剂,HPWR 高性能减水剂,减水率 26%,泌水率 45%,含气量 2.5%。砂,河砂细度模数 2.6。水泥,“海螺牌”P.042.5 普通硅酸盐水泥。

不同纤维的外观见图 1。其中聚乙烯醇 PVA 纤维为常州天怡工程纤维公司生产。具体参数见表 1。

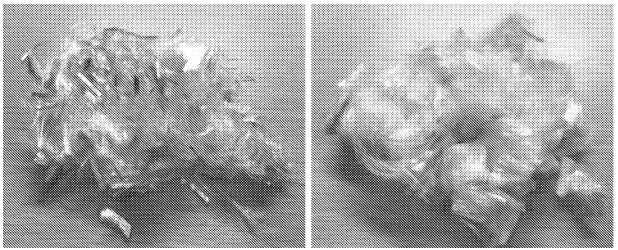
表 1 PVA 纤维力学参数性能信息表

断裂强度 /MPa	断裂延伸 率/%	弹性模量 /GPa	密度 /(g·cm ⁻³)	耐热水性 /℃	长度 /mm	分散 级
≥846	6.0~8.0	≥22.3	1.3	≥104	M±0.5	1~3

超高分子量聚乙烯 UPE 为湖南中泰特种装备有限责任公司生产,具体参数如表 2 所示。

表 2 UPE 纤维力学性能信息表

断裂强度 /MPa	断裂延伸率 /%	弹性模量 /GPa	密度 /(g·cm ⁻³)	直径 /μm
4340	3.94	123.0	0.97	9.4



(a) PVA 纤维外观图 (b) UPE 纤维外观图

图 1 不同纤维的外观图

1.2 试验方案

试验主要针对聚乙烯醇纤维 PVA、超高分子量聚乙烯纤维 UPE、两种纤维各占一半,3 类情况的纤维体积掺入量分别为 0.05%、0.1%、0.2%、0.4%,长度为 12 mm,试件尺寸为 15 cm×15 cm×30 cm(轴心抗压强度试验试样),分别进行不同龄期抗压强度、抗折强度变化规律的试验研究,并分析抗折比的变化规律,抗压抗折试验一体机采用江苏卓恒测控技术有限公司生产的 HG-YH300BD 微机电液伺服压力试验机,提供最大试压压力 300 kN,最大抗折试验力 20 kN。

制样步骤如下:首先将砂、石子、水泥依次倒入混凝土搅拌锅中,干拌 2 min,至砂、石子、水泥混合料均匀。其次将水、纤维、减水剂混合后边搅拌边倒入搅拌锅中,混合物加完后继续搅拌 2 min。最后将混凝土分层浇筑在试模中,并放振动台振捣密实,放置阴凉处盖膜浇水养护。

1.3 试样材料配比方案

试样组的组名以及相应成分配比如表 3 所示。

2 试验结果及分析

2.1 不同纤维不同掺入量时纤维混凝土抗压强度变化规律分析

PVA 纤维组、UPE 纤维组、混合纤维组试样不同

龄期抗压强度(本文实验分析值为 5 块试样去掉最大值和最小值后的平均值)变化规律见图 2—图 4。

表 3 纤维增强硅酸盐混凝土的试样组份配比表

纤维类型	组名	纤维掺量/%	水泥/kg	砂/kg	碎石/kg	水/kg	减水剂/kg	水灰比	砂率
无	C40	0.0	500	600	1110	195	5	0.39	0.35
PVA	P4	0.4(5.20 kg)	500	600	1110	195	5	0.39	0.35
	P3	0.3(3.90 kg)							
	P2	0.2(2.60 kg)							
	P1	0.1(1.30 kg)							
UPE	U4	0.4(3.88 kg)	500	600	1110	195	5	0.39	0.35
	U3	0.3(2.91 kg)							
	U2	0.2(1.94 kg)							
	U1	0.1(0.97 kg)							
PVA + UPE	H4	0.4(2.60 kg + 1.940 kg)	500	600	1110	195	5	0.39	0.35
	H3	0.3(1.95 kg + 1.455 kg)							
	H2	0.2(1.30 kg + 0.970 kg)							
	H1	0.1(0.65 kg + 0.485 kg)							

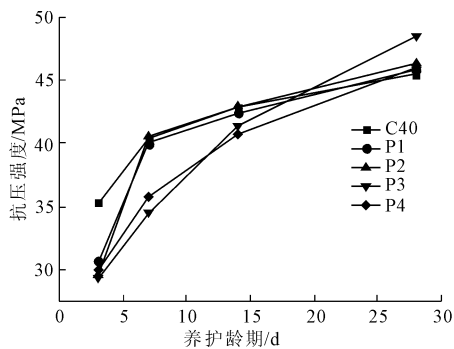


图 2 PVA 纤维混凝土抗压强度示意图

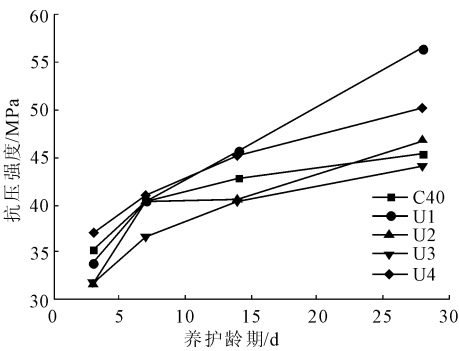


图 3 UPE 纤维混凝土抗压强度示意图

抗压强度分布规律显示:未添加纤维的混凝土的早期抗压强度均最高,3 d 抗压强度为 35.3 MPa,其中单掺 PVA 纤维的混凝土的 3 d 抗压强度相对最低约为 30 MPa。说明纤维的加入,在初期没有发挥桥接作用,降低了混凝土的抗压强度。UPE 纤维组的初期强度相对较高,说明 UPE 纤维与混凝土的结合力比 PVA 纤维好。

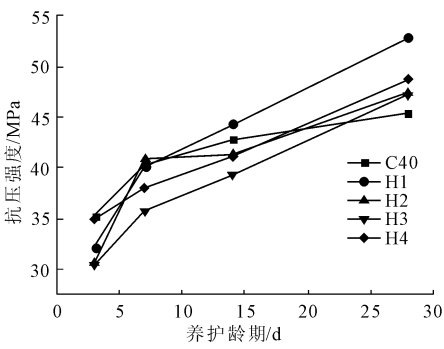


图 4 混合掺加 PVA 和 UPE 纤维混凝土抗压强度示意图

不同龄期强度增长速度分布规律显示:纤维混凝土 7 d 前的强度增长速率基本都大于普通混凝土,说明纤维与混凝土基质之间的桥接作用在 7 d 后就开始显现,强度明显增加。7 d 后的增长速率放缓,但纤维比普通混凝土增长速率快,因此纤维的桥接作用对抗压强度的增加是明显的。

2.2 不同纤维不同掺入量时纤维混凝土抗折强度变化规律分析

PVA 纤维组、UPE 纤维组、混合纤维组试样不同龄期抗折强度变化规律见图 5—图 7。

抗折强度分布规律显示:掺入纤维后的抗折强度均大于素混凝土的抗折强度;其中 UPE 纤维组的 7 d 龄期抗折强度增加最明显,纤维掺入量 0.2% 时抗折强度增加最大达 54%;PVA 纤维组的 7 d 龄期抗折强度增幅平均最小,纤维掺入量 0.2% 时抗折强度增加最大约 14%;混合纤维组的抗折强度介于两类单掺情况之间,但接近 UPE 纤维组情况,从经济性看,由于 PVA 纤维比 UPE 便宜,因此混合纤维

的综合效益最高。

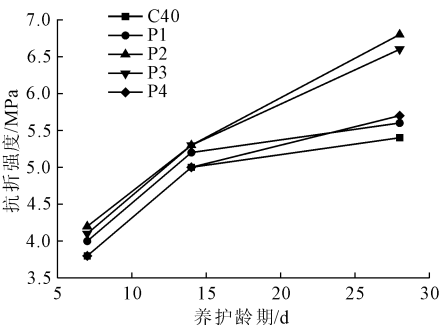


图 5 PVA 纤维混凝土抗折强度示意图

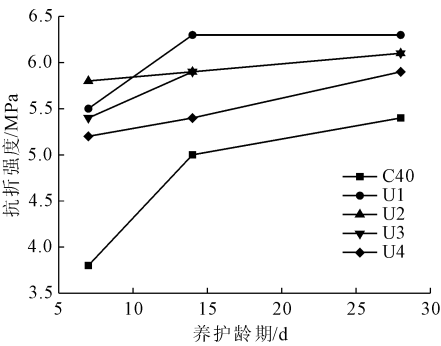


图 6 UPE 纤维混凝土抗折强度示意图

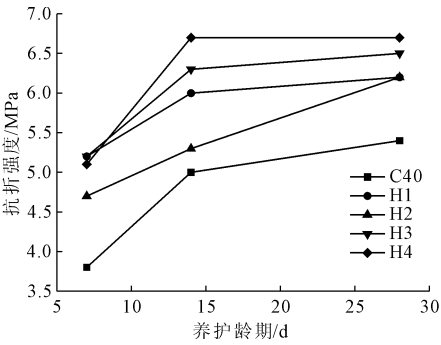


图 7 混合掺加 UPE + PVA 纤维混凝土抗折强度示意图

2.3 不同纤维不同掺入量时纤维混凝土折压比变化规律分析

PVA 纤维组、UPE 纤维组、混合纤维组试样不同龄期折压比变化规律见图 8—图 10。

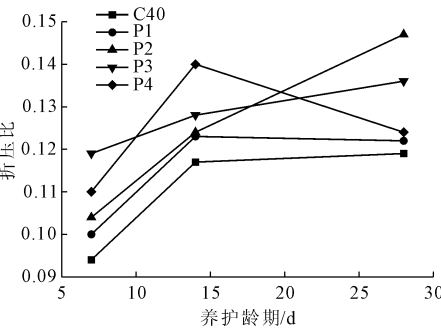


图 8 单掺 PVA 纤维混凝土折压比示意图

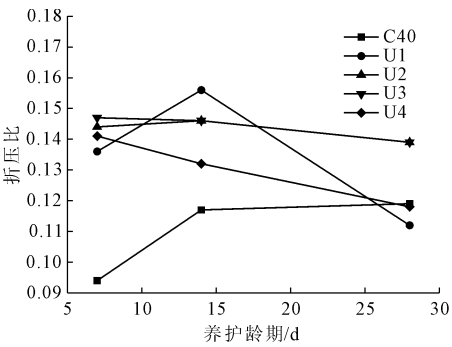


图 9 单掺 UPE 纤维混凝土的折压比示意图

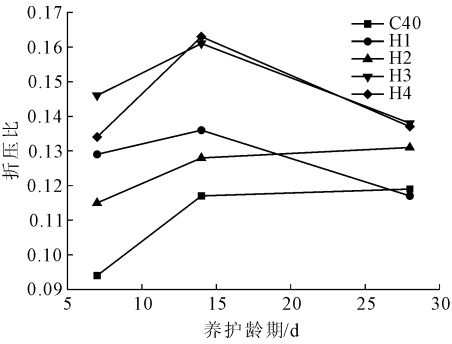


图 10 复掺 UPE 和 PVA 纤维混凝土折压比示意图

除了 UPE 纤维组和混合纤维组在纤维掺量 0.1% 时,28 d 后最终的折压比略小于素混凝土的折压比 0.118(此时的纤维混凝土的抗折强度和抗压强度均大于素混凝土,说明破裂面上纤维的阻裂作用是明显的,即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^[14]。但抗压强度的增幅远大于抗折强度的增幅,从而导致折压比减小),其他的试样折压比均增加了,说明大部分情况下,在抗折断面上,几乎所有贯穿的纤维都参与阻裂作用,而抗压时,微裂纹的扩展形式和路径多样,直接参与阻裂的纤维相对较少,而且抗压强度本身值比较大,因此折压比一般都呈现增大规律,总体上纤维的增韧效果比较明显。

2.4 不同纤维不同掺入量时 28 d 强度分布规律分析

28 d 龄期的混凝土水化程度较高,内部胶凝成分趋于稳定因而力学性能较稳定,能充分反映混凝土终期力学性能指标,是实际工程应用的主要参考依据。28 d 龄期的混凝土抗压强度、抗折强度、折压比统计见图 11—图 13。

(1) 28 d 抗压强度分布规律分析。针对 UPE 纤维混凝土,UPE 体积掺量 0.1% 时抗压强度最大,较素混凝土抗压强度提高 24.4%,达 56 MPa;掺加

0.2% 和 0.3% 的纤维时,强度提高率分别为 3% 和 -3%;纤维体积掺量增加至 0.4% 时,强度提高率增加为 10%。这种抗压强度变化的规律与张玉武^[15]掺加 UPE 纤维的立方体试块抗压强度规律比较类似:他分别掺加 0.3%、0.5%、0.7%、1.0% 的 UPE 纤维(加捻成线),得出结果为 0.3% 纤维增强效果明显,0.5% 和 0.7% 提高率下降,1.0% 提高率增加但仍不及 0.3% 掺量的提高率。所以,两者的试验不同地方为,本试验采用的是 UPE 纤维单丝,而张玉武添加的是加捻 400 根单丝组成的纤维线,因此总掺入量不同,但总体的规律一致,说明该规律主要是受纤维的根数量影响比较大。

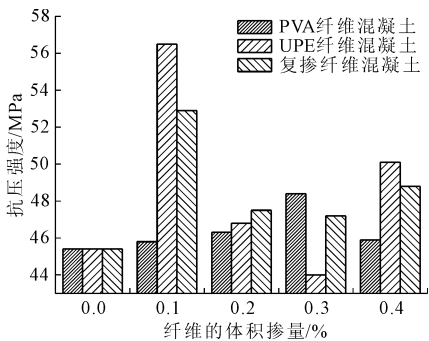


图 11 28 d 龄期的纤维混凝土抗压强度

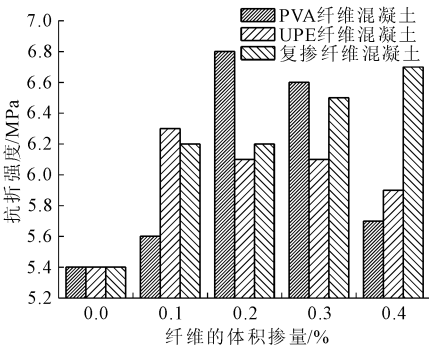


图 12 28 d 龄期纤维混凝土抗折强度

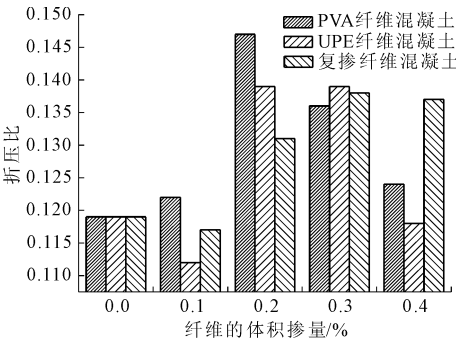


图 13 28 d 龄期纤维混凝土折压比

针对 PVA 纤维混凝土,随着纤维含量增加,抗压强度出现先增加后减小的规律,掺加体积掺量为

0.3% 时的抗压强度最大,比素混凝土抗压值提高 6.6%,为 48.4 MPa。

针对复合纤维混凝土,抗压强度变化规律与单掺 UPE 纤维的变化规律类似,但随着掺量变化浮动更小,在复掺纤维体积掺量 0.1% 时抗压强度提高率最高为 16.5%,最大抗压强度 53 MPa。

(2) 28 d 抗折强度分布规律分析。单掺 PVA 和 UPE 纤维混凝土的抗折强度均随着纤维的掺量出现先增加后减小的规律,从提升抗折性能分析,PVA 纤维的最佳掺量为 0.2% 和 0.3% 之间,28 d 龄期的抗折强度分别为 6.8 MPa、6.6 MPa,最大提高率为 26%;UPE 纤维的最佳掺量为 0.1%,28 d 龄期的抗折强度为 6.1 MPa,提高率为 16.7%;复合掺加的最佳掺量为 0.4%,28 d 龄期的抗折强度为 6.6 MPa,提高率为 24.1%。说明 PVA 纤维对抗折强度提高最明显,复合纤维情况下,由于 PVA 纤维减少,抗折强度最大值也减小,但用一半含量的 UPE 纤维替换 PVA 纤维导致的最大抗折强度降低很少,但由于两种纤维的弹性模量大于混凝土的程度不同,协同变形的能力不同,破坏时起到了过渡的作用,协同变形作用下的抗压强度最大值比单掺入 PVA 要强很多,说明两种不同弹性模量的纤维在微裂纹扩展过程中起到形成过渡协同作用的效果。

(3) 28 d 折压强度比分布规律分析。混凝土的折压比在合适的纤维掺量较高。单掺 PVA 纤维含量为 0.2% 时增韧效果最佳,折压比最大为 0.147,提升 24.5% (素混凝土的折压比 0.118);单掺 UPE 纤维含量为 0.2% ~ 0.3% 的增韧效果最佳,折压比最大为 0.138,提升 16.9%;混合纤维含量为 0.3% ~ 0.4% 的增韧效果最佳,折压比最大为 0.136,提升 15.3%。整体上纤维的增韧效果比较明显。

3 结 论

(1) 纤维增加对混凝土的强度增加作用是有限的,纤维混凝土的力学性能与纤维的种类、掺量、掺加方式(单掺,混合掺)、纤维分布的均匀性等都有关系,其最佳掺量影响因素众多,具体设计时应根据施工工程的控制条件结合实际原材料配比等条件现场试验确定。

(2) 虽然 UPE 纤维混凝土强度增强效果好,但由于制样过程中 UPE 纤维很难分散均匀,当纤维掺量大于 0.1% 时,随着纤维量增多,流动性变差,纤维的分散性离散性变大,强度反而降低。而 PVA 分散相对比较均匀,28 d 的抗压强度离散性相对较小,

抗折强度最大值提高率最高,说明其总体粘结阻裂效果较好。

(3) 混合纤维(UPE 和 PVA 纤维体积含量 1:1)混凝土试样 28 d 的抗折强度分布在 6.0 MPa ~ 6.6 MPa 之间,离散性最小,抗折强度最佳掺量为 0.4%,此时抗折强度为 6.6 MPa,提高率为 24.1%;抗压强度达 49 MPa,提高率为 8%;折压比为 0.135,提升 14.4%。混合纤维由于其黏结阻裂效果有一个过渡,对抗压强度和抗折强度的提高有一定综合作用效应,而且混合纤维经济性更好,因此建议采用混合纤维,其最佳纤维含量为 0.3% ~ 0.4%。

参考文献:

[1] 郭 锋. 高韧性纤维混凝土框架柱抗震性能分析 [C]//第 28 届全国结构工程学术会议论文集(第Ⅲ册),2019:36-42.

[2] 钟 波. STC 超高韧性混凝土配合比的研究与应用 [J]. 四川水力发电,2019,38(5):41-43,52.

[3] 于明鑫. 超强韧性混凝土修补研究 [C]//第十六届沈阳科学学术年会论文集(理工农医),沈阳市科学技术协会,2019:74-76.

[4] 刘 洋,欧忠文,胡志德,等. 高韧性混凝土复合材料研究与应用进展[J]. 合成纤维,2019,48(9):43-46.

[5] 江世永,蔡 涛,李雪阳. 碳纤维复合材料筋高韧性水泥基复合材料柱拟静力试验对比研究[J]. 工业建筑,

2018,48(9):181-186,216.

[6] 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(5):131-135.

[7] Li V C, Leung C K Y. Steady-state and multiple cracking of short random fiber composites [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1992,118(11):2246-2264.

[8] 徐世焱,李贺东. 超高韧性水泥基复合材料研究进展及其工程应用[J]. 土木工程学报,2008(6):45-60.

[9] 江世永,陶 帅,飞 渭,等. 高韧性纤维混凝土受弯性能试验研究[J]. 工业建筑,2018,48(6):111-118.

[10] 于明鑫,俞家欢. 超强韧性混凝土与钢筋黏结性能研究[J]. 混凝土,2018(10):57-61.

[11] 王义超,侯梦君,余江滔,等. 聚乙烯纤维制备超高延性水泥基复合材料的试验研究[J]. 材料导报,2018,32(20):3535-3540.

[12] 董新心. 长大隧道高抗弯韧性混凝土铺装应用研究 [J]. 公路,2019,64(12):67-71.

[13] 李银波. 基于正交试验的高韧性纤维混凝土受弯性能研究[J]. 新型工业化,2019,9(11):125-128.

[14] 陈 倩. 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[J]. 水利与建筑工程学报,2019(6):113-116.

[15] 张玉武. UHMWPE 纤维混凝土静动态力学性能研究 [D]. 长沙:国防科学技术大学,2014.



(上接第 160 页)

[5] 王 玲,张洪涛,姚 燕,等. 超细复合水泥及其混凝土性能的研究 [J]. 建筑材料学报,2002,5(2):103-107.

[6] Noske P. 超细水泥灌浆在岩土工程中的应用 [C]//岩石与混凝土灌浆译文集,1995:48-52.

[7] Borchardt P. 有效灌入法——一种新的灌浆工艺一使用超细水泥和聚氨酯进行补充灌浆的实例 [C]//岩石与混凝土灌浆译文集,1995:93-100.

[8] Pantazopoulos L A, Markou I N, Christodoulou D N, et al. Development of microfine cement grouts by pulverizing ordinary cements [J]. Cemnet & Concrete Composites, 2012,34(5):593-603.

[9] 于秀文,李承先. 沙砾岩中的超细水泥灌浆试验 [J]. 水利发电,2001(7):34-36.

[10] 马志登,陈建有,郑雄伟,等. 超细水泥帷幕灌浆在某水库除险加固中的应用 [J]. 施工技术,2012,41:351-353.

[11] 管学茂,胡曙光,丁庆军,等. 超细高性能灌浆水泥的性能及其微观结构研究 [J]. 水泥,2003(6):10-13.

[12] 符 平,杨晓东. 灌浆水泥浆液结石强度计算方法研究 [C]//中国水利学会地基与基础工程专业委员会第十一次全国学术技术研讨会暨 2011 年全国水利水电地基与基础工程学术研讨会. 北京:中国水利水电出版社,2011:25-30.