

DOI :10.3880/j.issn.1006-7647.2010.05.011

纤维素纤维矿物掺合料改善高性能混凝土抗裂性能

王德志^{1,2}, 孟云芳^{1,2}, 万良兴¹

(1. 宁夏大学土木与水利工程学院, 宁夏 银川 750021 ;
2. 旱区现代农业水资源高效利用教育部工程研究中心, 宁夏 银川 750021)

摘要 利用极差分析和方差分析, 研究纤维素纤维、粉煤灰、煤矸石、硅灰等对混凝土抗压强度、劈裂强度和拉压比的影响。在保证混凝土劈裂强度的基础上, 优选混凝土配合比进行混凝土抗裂性能试验。试验结果表明, 纤维素纤维对混凝土的强度无明显影响, 但可显著改善混凝土抗裂性能, 矿物掺合料也可以改善混凝土的抗裂性。

关键词 正交设计 纤维素纤维 混凝土强度 拉压比 混凝土抗裂性

中图分类号 :TU528.572 **文献标识码** :A **文章编号** :1006-7647(2010)05-0041-04

Crack resistance of high performance concrete mixed with cellulose fiber and mineral admixture // WANG De-zhi^{1, 2}, MENG Yun-fang^{1, 2}, WAN Liang-xing¹ (1. *Institute of Civil and Water Conservancy Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China* ; 2. *Engineering Research Center of Efficient Use of Water Resources in Arid Modern Agriculture, Ministry of Education, Yinchuan 750021, China*)

Abstract : By using the range analysis and the variance analysis, the influences of cellulose fiber, fly ash, coal gangue and silica fume on the compressive strength, splitting strength and proportion of tensile strength to compressive strength of concrete were studied. Under the prerequisite of ensuring the splitting strength of concrete, the concrete proportioning was optimized, and the tests on crack resistance of concrete were performed. The test results show that the cellulose fiber has no obvious impact on the concrete strength, instead, it significantly improves the crack resistance of concrete. The mineral admixture can greatly improve the crack resistance of concrete.

Key words : orthogonal design ; cellulose fiber ; concrete strength ; proportion of tensile strength to compressive strength ; crack resistance of concrete

混凝土成型后在与外界没有水分交换的情况下, 内部相对湿度随水泥水化的进展而降低, 造成毛细孔的水分不饱和而产生压力, 引起混凝土的自行收缩。在水灰比较高的普通混凝土中, 这部分收缩较小。近年来, 随着高强混凝土和高性能混凝土的应用和发展, 低水灰比的高强混凝土和高性能混凝土的自收缩比普通混凝土的自收缩大得多。高性能混凝土的水胶比很低, 能提供水泥水化的自由水分少, 早期强度较高的发展率会使自由水消耗较快, 在外界水分供应不足的情况下, 水泥水化不断消耗水分从而产生原始微裂缝, 影响混凝土的强度和耐久性^[1-2]。

20 世纪 60 年代以来, 研究人员开发了钢纤维、聚丙烯纤维、尼龙、涤纶、碳纤维等纤维增强混凝土, 通过增大纤维体积率、调整水泥基体的组成并改变制作工艺等, 控制水泥基体中微裂缝的产生和扩展,

改善混凝土的耐久性能, 促进了纤维增强混凝土的迅速发展。很多天然的有机纤维, 如西沙尔、麻、椰子壳的纤维以及甘蔗渣等也可以起到相似的作用。美国 ACI 544 委员会的报告指出^[3], 全世界约有 40 个国家在建筑中使用了非木浆植物纤维, 但该制品在使用过程中易发生质变, 强度和韧性随时间有较大幅度的下降, 存在耐久性问题。发展中国家如巴西、南非等非常重视天然植物纤维在混凝土中的应用研究, 近年来一些发达国家的科研单位在这方面的研究也取得了一定的进展^[4-5], 但在国内这方面的研究还比较少。笔者应用纤维素纤维提高混凝土的抗裂性。

1 纤维素纤维混凝土性能试验

1.1 试验方法

混凝土的拌和、成型养护、抗压强度、劈裂强度

试验方法依据 DL/T5150—2001《水工混凝土试验规程》^[6] 的规定实施,采用 100 mm×100 mm×100 mm 的模型,试件标准养护龄期为 28 d。根据国内外资料混凝土抗裂性能试验方法主要有 3 种:环形收缩试验法、平板法和温度应力试验机(或开裂架)试验方法,本试验采用平板法参照 CECS 38—2004《纤维混凝土结构技术规程》^[7] 的要求研究纤维素纤维混凝土的抗裂性。通过模具边框中双排栓钉对混凝土形成约束,通过底部表面粗糙的钢板与混凝土的直接黏结形成底部约束。试验采用正交试验方法,正交试验中因素水平如表 1 所示。

表 1 正交试验因素水平						
水平	水胶比	粉煤灰 质量 分数/ %	煤矸石 质量 分数/ %	硅灰 质量 分数 / %	砂率	纤维掺量/ (kg·m ⁻³)
1	0.34	10	10	0	0.40	0.6
2	0.31	15	15	4	0.43	0.9
3	0.28	20	20	8	0.46	1.2

1.2 试验原材料

a. 水泥:采用宁夏赛马水泥厂生产的 52.5 MPa 普通硅酸盐水泥,经检测满足国家标准的要求。

b. 细集料:采用宁夏镇北堡产山砂,细度模数为 3.0,表观密度为 2.60 g/cm³,堆积密度为 1.50 g/cm³,含泥量为 1.5%。

c. 粗集料:人工碎石,粒径为 5~20 mm,连续级配,压碎指标为 6.5%。

d. 粉煤灰:采用宁夏银欣源热电工贸有限公司产Ⅰ级粉煤灰,物理性能指标测试结果:细度(45 μm 筛余)为 0.054(国家标准为小于或等于 12),烧失量为 0.0203(国家标准为小于或等于 5.0),含水率为 0.0007(国家标准为小于或等于 1.0),SO₃ 为 0.002(国家标准为小于或等于 3.0),需水量比为 0.92(国家标准为小于或等于 0.95)。

e. 煤矸石:来源于宁夏石嘴山石炭井自燃煤矸石,其主要化学成分为 SiO₂ (53.1%), Al₂O₃ (36.4%), 经球磨机磨成粉末后使用,密度为 2.71 g/cm³,比表面积为 560 m²/kg。

f. 硅灰:来源于济南银丰硅制品有限公司生产的金属硅粉,比表面积为 20 000 m²/kg,其主要化学成分为 SiO₂ (99.2%), Al₂O₃ (0.24%)。

g. 外加剂:北京幕湖外加剂厂生产的 FDN 高浓型萘系高效减水剂。

h. 试验用纤维素纤维采用上海罗洋新材料科技有限公司生产的博凯超纤维(UltraFiber 500)产品,其比表面积为 25 000 cm²/g,抗拉强度为 600~900 MPa,断裂伸长率为 14%,弹性模量为 8 500 MPa,纤维长度为 1.9~2.3 mm,纤维直径为 14~17 μm,密

度为 1.1 g/cm³。该纤维通过在纤维素纤维的外表面涂覆 1 层无机高耐碱材料而具有高耐碱、高耐久性的性能,弥补了天然植物纤维耐碱性差的缺陷。

2 试验结果与分析

2.1 力学性能试验

根据表 1 进行混凝土力学性能试验,混凝土 28 d 抗压强度、劈裂抗拉强度见表 2。

表 2 混凝土 28 d 正交试验结果

试验号	抗压强度/ MPa	劈裂强度/ MPa	拉压比	试验号	抗压强度/ MPa	劈裂强度/ MPa	拉压比
1	53.3	3.54	0.066	10	58.4	4.11	0.070
2	62.9	3.88	0.062	11	56.5	3.77	0.067
3	57.4	3.85	0.067	12	59.5	3.74	0.063
4	56.8	4.26	0.075	13	63.7	4.11	0.065
5	69.3	4.26	0.061	14	49.8	4.08	0.082
6	61.5	3.68	0.060	15	58.8	4.52	0.077
7	62.2	3.89	0.063	16	69.5	3.6	0.052
8	66	4.07	0.062	17	68.1	3.77	0.056
9	68.1	4.3	0.063	18	61.1	3.17	0.052

2.1.1 抗压强度极差分析、方差分析

混凝土 28 d 抗压强度极差分析和方差分析分别见表 3 和表 4。

表 3 混凝土 28 d 抗压强度极差分析 MPa

影响因素	样本均值			极差 R
	水平 1	水平 2	水平 3	
水胶比	58.0	60.0	65.8	47.0
粉煤灰	60.7	62.1	61.1	8.7
煤矸石	60.3	63.1	60.4	17.1
硅灰	57.4	62.3	64.1	40.6

表 4 混凝土 28 d 抗压强度方差分析

方差来源	平方和	自由度	均方和	F 值	F 临界值	显著性
水胶比	199.03	2	99.52	19.20	F _{0.99} (2,13) = 6.7	显著
粉煤灰	6.69	2	3.35		F _{0.95} (2,13) = 3.81	
煤矸石	30.70	2	15.35			
硅灰	145.97	2	72.99	14.08		显著
砂率	27.95	2	13.98			
纤维	9.88	2	4.94			

注:F 值指显著性检验时检验统计量 F 的函数值。

R 的大小反映相应因素作用的大小,各因素对混凝土 28 d 抗压强度的影响从主到次的顺序为:水胶比→硅灰→煤矸石→砂率→纤维→粉煤灰。水胶比和硅灰对混凝土 28 d 抗压强度的影响最大,煤矸石、粉煤灰、砂率、纤维素纤维的影响较小。当水胶比的水平为 0.28、硅灰的水平为 0.8% 时混凝土的强度最大,但现场试验发现水胶比的水平为 0.28 时,混凝土拌合物的流动性很差,标准振动台不能振捣密实。

由表 4 可知,水胶比、硅灰对混凝土 28 d 抗压强度的影响特别显著,粉煤灰和煤矸石、砂率和纤维对混凝土强度的影响不明显。

2.1.2 劈裂强度极差分析、方差分析

混凝土 28 d 劈裂抗拉强度极差分析和劈裂强度方差分析见表 5 和表 6。

表 5 混凝土 28 d 劈裂抗拉强度极差分析 MPa

影响因素	样本均值			极差 <i>R</i>
	水平 1	水平 2	水平 3	
水胶比	3.8	4.2	3.8	2.1
粉煤灰	3.9	4.0	3.9	0.6
煤矸石	4.0	3.8	3.9	1.1
硅灰	3.7	4.0	4.1	2.3
砂率	3.8	4.0	4.0	1.0
纤维	3.9	4.0	3.9	0.6

表 6 混凝土 28 d 劈裂强度方差分析

方差来源	平方和	自由度	均方和	<i>F</i> 值	<i>F</i> 临界值	显著性
水胶比	0.48	2	0.240	63.60	$F_{0.99}(2,5) = 13.3$	显著
粉煤灰	0.04	2	0.020	4.75	$F_{0.95}(2,5) = 5.79$	较显著
煤矸石	0.12	2	0.060	15.36	$F_{0.90}(2,5) = 3.78$	显著
硅灰	0.51	2	0.255	67.14		显著
砂率	0.11	2	0.055	14.04		显著
纤维	0.04	2	0.020	5.39		较显著

由表 5 和表 6 可知,各因素对混凝土 28 d 劈拉强度的影响从主到次的顺序为 :硅灰→水胶比→煤矸石→砂率→纤维→粉煤灰,水胶比、煤矸石、硅灰、砂率对混凝土 28 d 劈裂抗拉强度的影响特别显著,粉煤灰和纤维对混凝土 28 d 劈裂抗拉强度有一定的影响。当水胶比的水平为 0.31、粉煤灰的水平为 15%、煤矸石的水平为 10%、硅灰的水平为 8%、砂率为 43%、纤维掺量为 0.9 kg/m³ 时,混凝土 28 d 劈裂抗拉强度可取得最大值。

2.1.3 拉压比极差分析、方差分析

混凝土拉压比极差分析和方差分析见表 7 和表 8。

表 7 混凝土拉压比极差分析

影响因素	样本均值			极差 <i>R</i>
	水平 1	水平 2	水平 3	
水胶比	0.066	0.070	0.058	0.072
粉煤灰	0.065	0.065	0.064	0.009
煤矸石	0.067	0.061	0.066	0.038
硅灰	0.065	0.065	0.064	0.009
砂率	0.062	0.067	0.065	0.032
纤维	0.065	0.065	0.065	0.001

表 8 混凝土拉压比方差分析

方差来源	平方和	自由度	均方和	<i>F</i> 值	<i>F</i> 临界值	显著性
水胶比	4.5×10^{-4}	2	2.2×10^{-4}	79.54	$F_{0.99}(2,5) = 7.21$	显著
粉煤灰	8.1×10^{-6}	2	4.0×10^{-6}		$F_{0.95}(2,5) = 3.98$	
煤矸石	1.3×10^{-4}	2	6.4×10^{-5}	23.10	$F_{0.90}(2,5) = 2.86$	显著
硅灰	8.1×10^{-6}	2	4.1×10^{-6}			
砂率	8.5×10^{-5}	2	4.3×10^{-5}	15.65		显著
纤维	1.1×10^{-7}	2	5.6×10^{-8}			

拉压比是反映混凝土脆性的指标之一。拉压比

越小脆性越大,韧性越小。通过极差分析可知,各因素对混凝土拉压比的影响从主到次的顺序为 :水胶比→煤矸石→砂率→硅灰→粉煤灰→纤维。由表 8 可知,水胶比、煤矸石和砂率对混凝土的拉压比影响高度显著,其余因素影响不明显。当水胶比的水平为 0.31、粉煤灰的水平为 10%、煤矸石的水平为 10%、硅灰的水平为 4%、砂率为 43%、纤维掺量为 1.2 kg/m³ 时,混凝土拉压比可取得最大值。

2.2 混凝土最优配合比的确定

由极差分析和方差分析表明,正交试验的 6 种因素对混凝土抗压强度、劈裂抗拉强度和拉压比有着不同的影响。本次试验以混凝土劈裂抗拉强度和拉压比为主要指标,兼顾抗压强度,在此基础上选取最优混凝土配合比,通过计算分析混凝土取得最优性能的配合比,进行混凝土早期开裂试验。选择最优配合比的原则是 :对于重要因素优先确定最优水平,对不重要因素根据提高效率、节约、方便的原则选择适当水平。通过以上分析最终确定混凝土最优配合比为 A2B2C2D3E3F1。

2.3 混凝土早期开裂试验

在最优配合比的基础上进行混凝土抗裂性能试验,研究纤维素纤维和矿物掺合料对混凝土抗裂性能的影响,混凝土抗裂性试验及结果配合比见表 9 和表 10。

表 9 混凝土抗裂性试验配合比 kg/m³

试验组号	水	水泥	粉煤灰	煤矸石	硅灰	<i>F</i> 纤维
C1	155	500	0	0	0	0
C2	155	500	0	0	0	0.6
C3	155	310	75	75	40	0
C4	155	310	75	75	40	0.6

表 10 混凝土抗裂性能试验结果

试验组号	开裂时间/ min	最大裂缝 宽度/mm	开裂面积/ mm ²
C1	43	1.5	239.3
C2	115	0.4	71.2
C3	78	0.9	166.8
C4	122	0.4	63.8

混凝土成型并停放 2 h 后重新抹面,然后风扇吹试件表面,风速为 5 m/s,加速混凝土开裂,成型后 24 h 观察裂缝数量、长度和宽度。由表 10 可知,纤维素纤维对混凝土抗裂性影响明显 :①使第 1 条裂缝的出现时间推迟。C2 组和 C4 组分别较基准组 C1 推迟 72 min,79 min。②使最大裂缝宽度降低,C2 组和 C4 组的最大裂缝宽度较 C1 组均降低 73%。③使开裂面积减少,C2 组和 C4 组的较 C1 组降低 70.2%和 73.3%。矿物掺合料也改善了混凝土的抗裂性,C3 组裂缝出现时间比 C1 组推迟 35 min、最大

裂缝宽度和开裂面积分别减少约 40% 和 30.2%。

3 机理分析

纤维素纤维掺入混凝土后,按混合定律进行测算。由于纤维素纤维与混凝土基体的弹性模量比很低(仅为 1/9 ~ 1/6),抗压强度、抗拉强度、拉压比与素混凝土相比变化不大甚至还会降低,且因纤维掺量甚小,故其降低幅度可以忽略不计。

纤维素纤维可阻止水泥基体中微裂缝的产生与扩展。水泥基体在浇筑后的 24 h 内抗拉强度极低,若处于约束状态,其所含水分急剧蒸发时极易生成大量裂缝,均匀分布于水泥基体中的纤维可承受因塑性收缩引起的拉应力,从而阻止或减少裂缝的生成。水泥基体硬化后,因周围环境温度与湿度的变化而引起的拉应力超过其抗拉强度时,也极易生成大量裂缝,此情况下纤维素纤维可阻止或减少裂缝的生成。

在混凝土中掺入的硅灰、粉煤灰等矿物细掺料,均匀分散到水泥浆体中,会成为大量水化物沉积的核心,随着水化龄期的进展,这些细微颗粒及其水化反应产物填充水泥石孔隙,改善了混凝土孔结构和抗裂性能。

4 结 论

a. 正交试验的极差和方差分析表明纤维素纤维对混凝土的强度几乎无影响,但抗裂性能试验表

明纤维素纤维可以显著改善混凝土的抗裂性能,掺加 0.9 kg/m³ 的纤维后开裂面积降低 70.2%。矿物掺合料的复掺同样可以改善混凝土的抗裂性,使开裂面积减少 30.2%。

b. 硅灰使混凝土抗压强度、劈裂强度和拉压比显著提高,最优掺量为 8%。但是由于价格的原因,硅灰的使用应该慎重。粉煤灰对混凝土 28 d 强度的影响不明显,主要是由于龄期较短,掺量少的原因;煤矸石可显著提高混凝土 28 d 劈裂强度和拉压比;砂率改善了混凝土的拉压比。

参考文献：

[1] NAWY E G. Fundamentals of high performance concrete[M]. 2nd edition. New York :John Wiley & Sonns, Inc, 2001 :14-22.
[2] 管学茂,杨雷,姚燕. 低水灰比高性能混凝土的耐久性研究[J]. 混凝土, 2004(10) 3-5.
[3] ACI 544.1R—96 Fiber reinforced concrete[S].
[4] SAVASTANO Jr H, WARDEN P G, Coutts R S P. Potential of alternative fibre cements as building materials for developing areas[J]. Cement& Concrete Composites, 2003,25 :585.
[5] RANA A K, MANDAL A, MITRA B C. Short jute fibre reinforced polypropylene composites[J]. J Appl Polym Sci, 1998,69(2) 329.
[6] DL/T5150—2001 水工混凝土试验规程[S].
[7] CECS38—2009 纤维混凝土结构技术规程[S].

(收稿日期 2009-09-29 编辑 方宇彤)

(上接第 18 页)

参考文献：

[1] 洪阳. 中国 21 世纪的水安全[J]. 环境保护, 1999(10) : 1-5.
[2] 汪恕诚. 解决水资源短缺的根本出路[EB/OL]. [2006-07-12]. <http://www.mwr.gov.cn/index/20060712/75629.asp>.
[3] 沈满洪,陈锋. 我国水权理论研究述评[J]. 浙江社会科学, 2002(5) :175-180.
[4] OHLSSON L. The turning of a screw :social resource scarcity as a bottle-neck in adaptation to water scarcity [J]. Stockholm Water Front, 2000(1) :10-11.
[5] 徐中民,龙爱华. 中国社会化水资源稀缺评价[J]. 地理学报, 2004,59(6) :983-988.
[6] 何建武. 地区间水资源利用对比分析模型研究[J]. 天津农学院学报, 2002,9(1) :42-44.
[7] 李世祥,成金华,吴巧生. 中国水资源利用效率区域差异分析[J]. 中国人口资源与环境, 2008,18(3) :215-220.

[8] 龙爱华,徐中民,张志强,等. 基于边际效益的水资源空间动态优化配置研究 :以黑河流域张掖地区为例[J]. 冰川冻土, 2002,24(4) :407-413.
[9] 王韶华,孟令刚,李智. 北京市工业用水投入产出模型[J]. 水利水电科技进展, 2006,26(4) :34-36.
[10] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴-2001[M]. 北京 中国统计出版社, 2001.
[11] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴-2002[M]. 北京 中国统计出版社, 2002.
[12] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴-2003[M]. 北京 中国统计出版社, 2003.
[13] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴-2004[M]. 北京 中国统计出版社, 2004.
[14] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴-2005[M]. 北京 中国统计出版社, 2005.
[15] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴-2006[M]. 北京 中国统计出版社, 2006.
[16] 陈素景,陈根年,韩亚芬,等. 中国省际经济发展与水资源利用效率分析[J]. 统计观察, 2007(22) :65-67.

(收稿日期 2009-04-13 编辑 高建群)