

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20230071

骨料粒径与纤维长度对玄武岩纤维 混凝土力学性能影响研究

张晓飞¹, 王帅臻¹, 庞耀立², 余志坚³, 陈新炜⁴

(1. 西安理工大学水利水电学院, 陕西 西安 710048; 2. 陕西省水务清洁能源集团有限公司, 陕西 西安 710082;
3. 江西省投资集团, 江西 南昌 330096; 4. 甘肃省水利水电勘测设计研究院有限责任公司, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 为研究骨料粒径及纤维长度对玄武岩纤维混凝土力学性能的影响, 考虑了三种骨料粒径和三种玄武岩纤维长度, 设计并制作了108个混凝土试件(立方体试件72个, 棱柱体试件36个), 并对其进行了轴压试验、劈裂抗拉试验和抗折试验, 分析了各参数对抗压强度、劈裂抗拉强度及抗折强度的影响规律, 使用随机纤维脚本进行了ABAQUS有限元建模分析, 并提出了相应强度计算方法。结果表明, 随着骨料粒径的增长, 基体混凝土的力学性能有所提升。而掺入玄武岩纤维后, 混凝土的力学性能增大幅度较骨料粒径提升大。30 mm骨料粒径的混凝土在掺入18、24 mm玄武岩纤维时的力学性能相对较好。所编写的随机纤维脚本在ABAQUS有限元建模结果与试验结果吻合较好, 考虑骨料粒径和玄武岩纤维长度的双参数影响的计算方法具有较好的适用性。

关键词: 玄武岩纤维; 骨料粒径; 抗压强度; 劈裂强度; 有限元分析; 强度计算

中图分类号: TU528.01; TV431⁺.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7709(2023)11-0160-05

1 引言

在水利工程中, 常使用较大粒径的粗骨料制作混凝土, 混凝土结构中常存在开裂等问题, 所以常常在混凝土构件中掺入玄武岩纤维, 以提升混凝土的各种性能和质量^[1]。现有研究表明^[2-3], 纤维长径比和体积掺量是影响玄武岩纤维混凝土强度的重要因素。而目前针对骨料粒径和纤维长度对混凝土强度的影响规律的研究较少。刘路路等^[4-6]对不同粗骨料粒径混凝土进行了抗压试验和劈裂抗拉试验, 发现混凝土的抗压强度和劈裂抗压强度均随骨料粒径的增大而减小; 王志杰等^[7]研究了三种不同长度的玄武岩纤维对混凝土力学性能的影响, 发现玄武岩纤维长度为16 mm的混凝土抗压强度优于50、6 mm; 牛建刚等^[8]利用有限元软件建立塑钢纤维轻骨料混凝土抗压模型, 模拟其裂缝演变过程及应变曲线, 通过对比模拟结果和试验结果验证了模型的准确性和可行性。玄武岩纤维增强混凝土的力学性能受玄武岩纤维长度及粗骨料粒径的影响, 但现有研究多针

对单一变量对混凝土力学性能的影响, 而对其耦合影响的研究相对较少。为此, 本文对108个试件进行了立方体抗压试验、劈裂抗拉试验和抗折试验, 使用ABAQUS有限元分析软件进行随机纤维分布模型脚本的编写及建模, 最后基于试验结果提出考虑骨料粒径和玄武岩纤维长度的双参数影响的强度计算方法, 以期在实际工程提供参考。

2 试验概况

2.1 试验材料

试验所用水泥为普通硅酸盐水泥; 细骨料为细度模数2.5且级配良好河沙; 粗骨料为二级铜川碎石, 且将其按试验方案对粒径进行筛分。试验混凝土设计强度等级为C35, 水灰比为0.4, 纤维体积掺量为1%, 配合比设计见表1。试验所用玄武岩纤维长度分别为12、18、24 mm。玄武岩纤维的物理参数见表2。

2.2 试验方法

依据《水工混凝土试验规程》^[9]进行混凝土基本力学性能试验, 采用150 mm × 150 mm × 150

收稿日期: 2023-01-14, 修回日期: 2023-02-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(51479168); 陕西省水利厅科技计划项目(2020slkj-12)

作者简介: 张晓飞(1978-), 男, 博士、教授、硕导, 研究方向为水工结构数值分析, E-mail: zhangxiaofei_lgd@163.com

表 1 玄武岩纤维混凝土配合比

Tab. 1 Mix proportion of basalt fiber concrete

试件编号	粗骨料最大 粒径 d/mm	纤维长 度 l/mm	水泥	粗骨料	砂	水
BFC20-0	20	0	343	1 239	698	137
BFC30-0	30	0	343	1 239	698	137
BFC40-0	40	0	343	1 239	698	137
BFC20-12	20	12	343	1 239	698	137
BFC20-18	20	18	343	1 239	698	137
BFC20-24	20	24	343	1 239	698	137
BFC30-12	30	12	343	1 239	698	137
BFC30-18	30	18	343	1 239	698	137
BFC30-24	30	24	343	1 239	698	137
BFC40-12	40	12	343	1 239	698	137
BFC40-18	40	18	343	1 239	698	137
BFC40-24	40	24	343	1 239	698	137

注:水泥、粗骨料、砂、水单位均为 kg/m^3 。

表 2 玄武岩纤维的物理参数

Tab. 2 Physical parameters of basalt fiber

纤维长度 l/mm	直径 $d/\mu\text{m}$	抗拉强 度/ MPa	弹性模 量/ GPa	极限延 伸率/ $\%$	密度 $/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$
12	17	3 000	110	3.1	2 640
18	17	3 000	110	3.1	2 640
24	17	3 000	110	3.1	2 640

mm 的立方体试件进行立方体抗压强度和劈裂抗拉强度试验,采用 $150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm} \times 550 \text{ mm}$ 棱柱体试件进行抗折强度试验。每种骨料粒径和纤维长度均制备 3 个试件,将试验结果取均值作为该设计参数的试验结果。

3 试验结果与分析

3.1 混凝土的工作性能分析

在制备纤维混凝土的过程中,为改善纤维的团聚性,采用分次加料的方式确保纤维在混凝土中的均匀分散。先将水泥、砂、石等原材料投入搅拌机,待原材料搅拌均匀后,再采用人工均匀抛洒的方式投入玄武岩纤维再次充分搅拌,直至搅拌完成。随着纤维的掺入,混凝土的坍落度有所降低。这是由于纤维的掺入需占用一定量的水泥砂浆包裹至其外表面,从而导致用于包裹砂石的水泥砂浆的量相对减少,进而提高了它们之间的相互摩擦力,故导致混凝土工作性能降低^[10]。玄武岩纤维长度的增大对混凝土流动性降低较小,其坍落度值保持在 150 mm 以上,对工程的实际应用影响较小。

3.2 抗压强度变化规律

玄武岩纤维长度及骨料粒径对混凝土立方体抗压强度的影响见图 1。由图 1(a)可知,混凝土立方体抗压强度随粗骨料粒径的增大总体呈上升趋势,相较于最大粗骨料粒径为 20 mm 的试件,

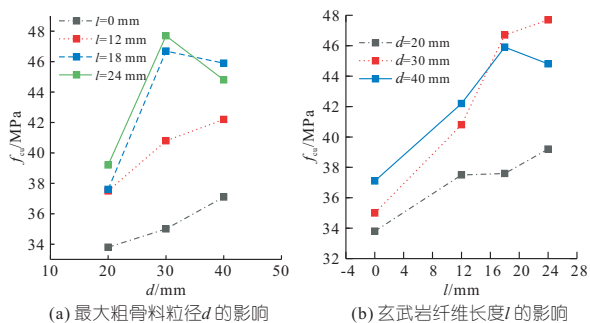


图 1 不同变化参数对立方体抗压强度的影响

Fig. 1 Effect of different variation parameters on cube compressive strength

最大粗骨料粒径为 30、40 mm 的混凝土立方体抗压强度分别提高了 14.9%、16.3%。这是因为骨料粒径的增大导致骨料在混凝土中所占的体积增大且比表面积减小,包裹骨料所需的水泥基减少,在承受轴向荷载时小骨料试件发生的是界面水泥基破坏,而大骨料试件发生的是骨料破坏,因此大骨料试件的抗压强度较高。值得注意的是,玄武岩纤维长度为 18、24 mm 时呈先上升后下降的趋势,这说明纤维长度在大于 18 mm 时与粒径较大的粗骨料的协同工作能力较差。由图 1(b)可知,随着纤维长度的增加,其抗压强度随之增大,相较于不掺玄武岩纤维的混凝土试件,纤维长度为 12、18、24 mm 的混凝土立方体抗压强度分别提高了 11.3%、20.3%、21.6%。不同的是,当混凝土最大粒径达到 40 mm 时,混凝土立方体的抗压强度随玄武岩纤维长度的增加呈波动下降的趋势,这同样说明长纤维与大骨料的协同工作能力较差。这是由于当骨料粒径增大时,其粗骨料需大量的泥浆包裹,此时由于骨料粒径过大不利于长纤维在混凝土中的分散效果,此时纤维在混凝土中容易粘结成团分散不均匀,会使其强度下降。此外,过长的纤维也会直接影响到纤维的间距。根据纤维间距理论,在间距较小的情况下,纤维的互交叉、重叠必不可免,其交叉重叠降低纤维与基体的粘合力,粘结强度下降的同时造成承载力大小不断减小,最后产生薄弱的区域,最终使得混凝土的抗压强度降低。

3.3 劈裂抗拉强度变化规律

玄武岩纤维长度及骨料粒径对混凝土劈裂抗拉强度的影响见图 2。由图 2(a)可知,混凝土劈裂抗拉强度随粗骨料粒径的增大总体上呈增大的趋势,相较于最大粗骨料粒径为 20 mm 的试件,最大粗骨料粒径为 30、40 mm 的混凝土劈裂抗拉强度分别提高了 13.7%、13.6%。在骨料粒径 $d \geq 30$ mm 时,混凝土的劈裂抗拉强度无明显提

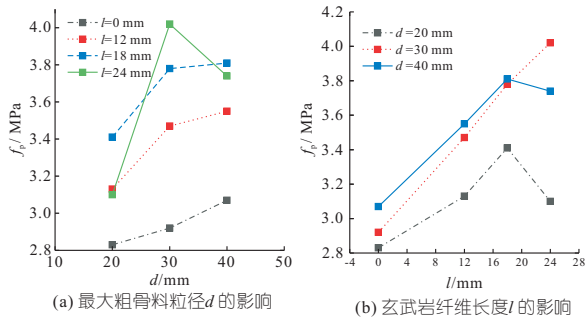


图 2 不同变化参数对劈裂抗拉强度的影响

Fig. 2 Effect of different variation parameters on splitting tensile strength

升,且玄武岩纤维长度为 18、24 mm 时混凝土劈裂抗拉强度先升高后降低。这是由于纤维与混凝土间存在的粘结作用造成的,在骨料粒径较大的条件下,部分纤维的分布方式会发生改变,二者间的粘结作用力降低,进而造成抗拉强度减弱的现象。由图 2(b)可知,混凝土劈裂抗拉强度随纤维长度的增大呈先上升后下降的趋势,相较于不掺玄武岩纤维的混凝土试件,纤维长度为 12、18、24 mm 的混凝土劈裂抗拉强度分别提高了 15.0%、24.1%、23.7%。这是因为玄武岩纤维可增强混凝土的韧性,抑制裂缝的扩展,但纤维长度达到 18 mm 以上时,纤维表面需要更多的水泥基包裹,且纤维长度的增加导致纤维间净距减小和出现交错,一定程度地削弱了混凝土的劈裂抗拉强度。对于 20、40 mm 骨料粒径的玄武岩纤维混凝土当其纤维长度增加时其抗拉强度先增加后减小,分析认为对于 20 mm 粒径混凝土,纤维会逐渐收缩,促使混凝土内部应变不均匀,其网架结构也会遭到破坏,这不利于强度提升和荷载分布。而对大粒径骨料其在混凝土内部需要大量的水泥浆进行粘结,使得玄武岩纤维在混凝土中的分散性降低,导致玄武岩纤维未起到减少孔隙的作用,这样也会对混凝土产生负面影响使其劈裂抗拉强度下降。

3.4 抗折强度变化规律

玄武岩纤维长度及骨料粒径对混凝土抗折强度的影响见图 3。由图 3(a)可知,随着粗骨料粒径的增大,混凝土抗折强度先增加后减少,相较于最大粗骨料粒径为 20 mm 的试件,最大粗骨料粒径为 30、40 mm 的混凝土抗折强度均值分别提高了 13.2%、8.5%,说明粗骨料粒径为 30 mm 时,纤维对混凝土抗折强度的增强作用最为明显。由图 3(b)可知,随着纤维长度的增加,混凝土抗折强度均值先增大后减小,相较于未掺入纤维的混凝土试件,纤维长度为 12、18、24 mm 的混凝土劈

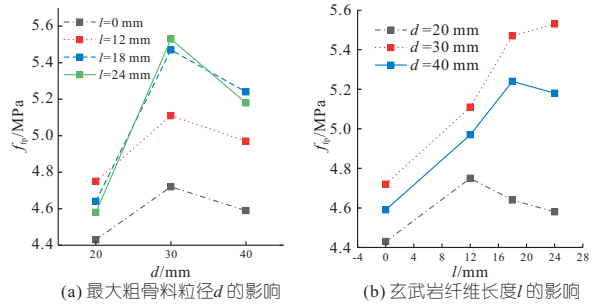


图 3 不同变化参数对抗折强度的影响

Fig. 3 Effect of different variation parameters on flexural strength

裂抗拉强度分别提高了 7.9%、11.7%、11.2%。其中粗骨料粒径为 30 mm 时混凝土抗折强度随纤维长度的增大而增大,这同样说明粗骨料粒径为 30 mm 时玄武岩纤维对混凝土的抗折强度提升作用最大。相较于长纤维,短纤维的边壁效应^[11]更弱,水泥浆体与纤维的粘结更加均匀,同时骨料粒径为 30 mm 时混凝土内部间隙更为均匀,在纤维长度为 12、24 mm 时,骨料与纤维能更好地提高混凝土的抗折强度。

4 有限元分析

4.1 材料本构模型

利用 ABAQUS 进行抗压试验的数值模拟,其中混凝土本构关系取用本文实测的混凝土应力应变曲线。本构关系可简单地认为是线弹性,直至发生断裂。

4.2 随机纤维模型

为模拟玄武岩纤维在混凝土中的随机分布,使用 Python 编写的随机纤维脚本代码,通过定义混凝土长、宽、高和纤维尺寸换算出纤维参量,得到相互之间的换算式。最后通过区域限定函数和随机函数定义纤维产生的范围和数量,以此达到随机纤维的效果,在 ABAQUS 中建立的随机纤维见图 4。

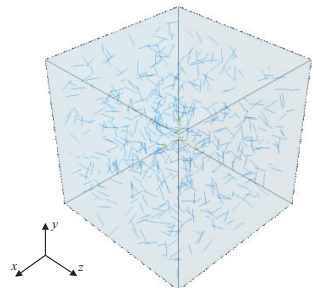


图 4 1%掺量的随机纤维模型

Fig. 4 Random fiber model with 1% content

4.3 模拟验证

图 5 为 $d=40$ mm 时试验值和模拟值的荷

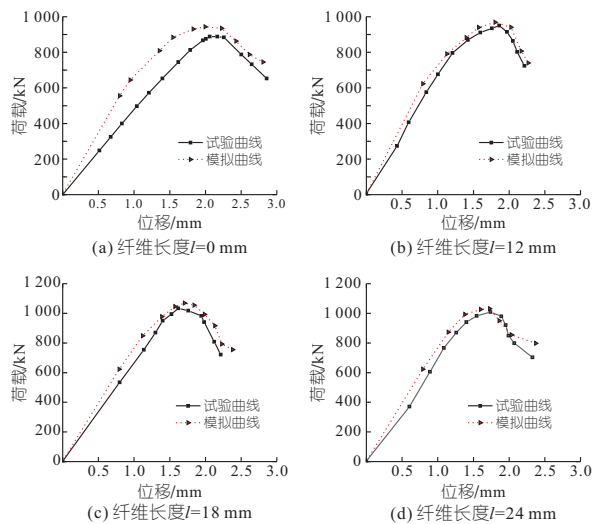


图 5 $d=40\text{ mm}$ 模拟与试验位移荷载曲线图

Fig. 5 Comparison of simulation and test load displacement curve when $d=30\text{ mm}$

载—位移曲线对比。由图 5 可知,使用随机桁架单元模拟纤维所得到的模拟结果曲线与试验结果曲线具有较好的吻合度,但仍存在初始刚度和峰值荷载过大的现象,究其原因为:①有限元模拟所使用的材料为理想材料,忽略了浇筑时材料不均匀误差、纤维材料强度误差和试验误差等,因此峰值荷载较大。②试验仪器加载过程中,混凝土内部被压实及仪器与试件间的空隙导致试验获取的荷载—位移曲线的刚度较小。但整体上看,所编写的随机纤维脚本能较好地模拟纤维在混凝土中的受力状态。

5 强度计算方法讨论

分析可知,玄武岩纤维可在混凝土中形成承载网,进而增强混凝土的各项强度指标,但同时纤维与骨料粒径共同作用时会对混凝土强度产生一定影响。因此,本文考虑了骨料直径和纤维长度对抗压强度、劈裂抗拉强度和抗折强度的影响,提出了各强度的计算方法。

基于本文试验结果进行最小二乘法拟合后的抗压承载力计算公式为:

$$\frac{f_{cu,d}}{f_{cu}} = \frac{1}{1 + 10^{-17} \beta l^6} \quad (1)$$

其中 $\beta = 1.825 \times 10^{-4} d^3 - 0.0299 d^2 +$

$$1.171d + 4.2 \quad (2)$$

式中, $f_{cu,d}$ 、 f_{cu} 分别为纤维混凝土抗压强度试验值、计算值; β 为粗骨料粒径率影响系数; d 、 l 分别为骨料粒径、纤维长度。

玄武岩纤维混凝土劈裂抗拉强度计算公式为:

$$f_p = f_{p0} [1 - 1.83 \times 10^{-4} \times (40 - d)^2 - 1.22 \times 10^{-4} \times (24 - l)^2] \quad (3)$$

式中, f_p 为纤维混凝土抗拉强度; f_{p0} 为素混凝土抗拉强度。

玄武岩纤维混凝土抗折强度计算公式为:

$$f_{fp} = f_{fp0} [1 - 1.24 \times 10^{-4} \times (40 - d)^2 - 1.53 \times 10^{-4} \times (24 - l)^2] \quad (4)$$

式中, f_{fp} 为纤维混凝土抗折强度; f_{fp0} 为素混凝土抗折强度。

根据所提出的强度计算方法计算本文试件强度,结果见表 3。由表 3 可知,抗压强度、劈裂抗拉强度及抗折强度计算结果与试验结果基本一致,抗压强度两者比值的平均值为 1.01,标准差和变异系数分别为 0.02、0.02;劈裂抗拉强度两者比值的平均值为 0.99,标准差和变异系数分别为 0.01、0.01;抗折强度两者比值的平均值为 1.00,标准差和变异系数分别为 0.01、0.01;说明计算式能较好反映不同骨料粒径和不同纤维长度的混凝土的强度计算,有一定工程应用价值。

表 3 计算值与试验值对比

Tab. 3 Comparison of calculated values and test values

试件编号	抗压强度			劈裂抗拉强度			抗折强度		
	试验值	计算值	计算值/试验值	试验值	计算值	计算值/试验值	试验值	计算值	计算值/试验值
BFC20-0	33.8	34.2	1.01	2.83	2.83	1.00	4.43	4.43	1.00
BFC20-12	37.5	38.1	1.02	3.13	3.10	1.01	4.75	4.77	1.00
BFC20-18	37.6	38.4	1.02	3.41	3.44	0.99	4.64	4.51	0.97
BFC20-24	39.2	39.8	1.01	3.10	3.12	0.99	4.58	4.61	1.01
BFC30-0	35.0	35.2	1.01	2.92	2.92	1.00	4.72	4.72	1.00
BFC30-12	40.8	41.5	1.02	3.47	3.51	0.99	5.11	5.05	0.99
BFC30-18	46.7	47.2	1.01	3.78	3.69	1.02	5.47	5.43	0.99
BFC30-24	47.7	47.1	0.99	3.74	3.75	1.00	5.53	5.66	1.02
BFC40-0	39.5	40.2	1.04	3.81	3.82	1.00	4.59	4.59	1.00
BFC40-12	42.2	40.3	0.96	3.55	3.54	1.00	4.97	4.89	0.98
BFC40-18	45.9	46.2	1.01	3.07	3.05	1.01	5.24	5.12	0.98
BFC40-24	44.8	44.1	0.98	4.02	4.01	1.00	5.18	5.16	1.00

注:试验值、计算值单位均为 MPa。

6 结论

a. 随着骨料粒径的增长,基体混凝土抗压和劈拉强度均有所提升,抗折强度随骨料粒径的增加而呈现先升高后降低的趋势。当骨料粒径为 30 mm、玄武岩纤维长度为 12~24 mm 时,玄武岩纤维增强混凝土的抗压强度、劈裂抗拉强度、抗折强度最高提高了 21.6%、24.1%、13.6%。

b. 使用 Python 编写的随机纤维脚本在 ABAQUS 有限元分析软件中能较好地反映玄武岩纤维增强混凝土的轴向抗压行为。

c. 考虑粗骨料粒径和玄武岩纤维长度的双参数强度计算结果与试验值比值在 0.96~1.04 之间,具有良好的适用性。

参考文献:

[1] 李黎, 曹明莉. 混杂纤维增强水泥基复合材料弯曲韧性与纤维增强指数的定量关系[J]. 复合材料学报, 2018, 35(5): 1349-1353.

[2] LI HONG, LIN JIAJIAN, LEI XIAOBAO, et al. Compressive strength prediction of basalt fiber reinforced concrete via random forest algorithm [J]. Materials today communications, 2022,30:103117.

[3] MEYYAPPAN P, JEMIMAH C M. Studies on strength properties of basalt fibre reinforced concrete[J]. Materials today: proceedings, 2021, 43: 2105-2108.

[4] 刘路路. 玄武岩纤维束混凝土力学性能试验研究与数值模拟[D]. 郑州: 郑州大学, 2020.

[5] 黄维蓉, 杨玉柱, 刘延杰, 等. 含粗骨料超高性能混凝土的力学性能[J]. 硅酸盐学报, 2020, 48(11): 1747-1755.

[6] 王江波, 张天星, 丁俊升, 等. 骨料粒径对混凝土力学性能影响研究[J]. 北京理工大学学报, 2021, 41(11): 1162-1170.

[7] 王志杰, 徐成, 王嘉伟, 等. 玄武岩纤维长度对喷射混凝土力学性能影响规律研究[J]. 隧道建设, 2020, 40(增刊1): 9-16.

[8] 牛建刚, 杨溪原, 徐泽华. 基于细观结构塑钢纤维骨料混凝土受压力学性能数值模拟[J]. 建筑科学, 2019, 35(3): 95-100.

[9] 中华人民共和国水利部. 水工混凝土试验规程: SL/T 352-2020[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2021.

[10] 皇甫秉辉. 混掺纤维对再生混凝土性能的影响研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2021.

[11] 张秀芝, 毕梦迪, 刘同军, 等. 钢纤维混凝土中纤维分布特性影响因素研究进展[J]. 硅酸盐学报, 2021, 49(8): 1732-1742.

Effect of Aggregate Size and Fiber Length on Mechanical Properties of Basalt Fiber Concrete

ZHANG Xiao-fei¹, WANG Shuai-zhen¹, PANG Yao-li², YU Zhi-jian³, CHEN Xin-wei⁴

(1. School of Water Resources and Hydropower Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. Shaanxi Water Affair Clean Energy Group Co., Ltd., Xi'an 710082, China; 3. Jiangxi Investment Group, Nanchang 330096, China; 4. Gansu Water Conservancy and Hydropower Survey and Design Research Institute Co., Ltd., Lanzhou 730000, China)

Abstract: In order to study the impacts of aggregate size and fiber length on the mechanical properties of basalt fiber concrete, three aggregate sizes and basalt fiber lengths have been taken into account, and 108 concrete test blocks (including 72 cubic test blocks and 36 prism test blocks) have been designed and made. Furthermore, axial compression test, splitting tensile test as well as bending test have been carried out to analyze each parameter influence on compression strength, splitting tensile strength and bending strength. On the basis of random fiber script, ABAQUS finite element modeling analysis is carried out, and the corresponding strength calculation has been proposed. The results show that with the increase of aggregate size, the mechanical properties of matrix concrete are improved. While with the adding of basalt fibers, the concrete mechanical properties rise higher than aggregate size increase. The concrete mechanical properties present good performance when 30mm aggregate size mixes with 18 mm and 24 mm basalt fibers. The result of designed random fiber script in ABAQUS finite element modeling matches with the experiment well, and the calculation method considering two-parameter influence of aggregate size and basalt fiber length has good applicability.

Key words: basalt fiber; aggregate particle size; compressive strength; splitting strength; finite element analysis; strength calculation

(上接第 211 页)

Study on Hydrodynamic Pressure Characteristics of Fan-shaped Central Revolving Gate

CAI Zhi-yong¹, YE Lin², FU Zong-fu¹

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Water Conservancy Project Construction Department in Suzhou, Suzhou 215011, China)

Abstract: The fan-shaped central revolving gate is a new type of gate with a significantly different flow pattern from the traditional gate. In order to study the hydrodynamic pressure characteristics of the fan-shaped central revolving gate, model experiment was conducted on the different opening coefficients of the gate based on the 60 m span gate of Wusongjiang regulation project and its energy dissipation design conditions, and the time-average pressure, average fluctuation amplitude, pulsation intensity and spectral characteristics under different opening coefficients were analyzed. The results show that the time-average pressure of the gate blade is positive pressure at each opening coefficient, and the overall pulsating pressure amplitude is relatively stable. The pulsating pressure of each measuring point is close to normal distribution under different opening coefficients. The pulsation intensity changes with the change of the opening and measuring point position. With the increase of the opening coefficient, the pulsation intensity presents a trend distribution of decreasing first and then increasing, and the pulsation intensity belongs to the low-frequency pulsation. The change of the measuring point position in the width direction will affect the pulsation intensity of the measuring point, and the center line pulsation intensity can be used instead of the whole gate pulsation intensity.

Key words: fan-shaped central revolving gate; hydrodynamic pressure; spectral characteristics; opening coefficient; model experiment