

泥石流防治工程混凝土材料的抗冲磨性能

方鑫^{1,2,3}, 陈晓清^{1,2,3}, 陈剑刚^{1,2}, 赵万玉^{1,2}

(1.中国科学院 山地灾害与地表过程重点实验室, 四川 成都 610041;

2.中国科学院 水利部 成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041; 3.中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: [目的] 开展在混凝土中复掺纳米二氧化硅、微硅粉、聚丙烯纤维等材料, 增强工程耐磨性的试验研究, 探讨复掺材料掺量变化影响抗冲磨强度的规律, 旨在为泥石流防护工程建设中抗冲磨混凝土的配合比设计提供科学参考。[方法] 采用正交试验设计的水下钢球法对混凝土试件进行水下冲磨试验, 得出了复掺纳米二氧化硅、微硅粉、聚丙烯纤维的混凝土试件的抗冲磨强度。[结果] 在选定的掺量范围内, 混凝土试件的抗冲磨强度随纳米二氧化硅的增加先增大再减小, 在掺量为 1.5% 时达到最大值; 随微硅粉的增加而增大, 在掺量为 12% 时达到最大值; 随聚丙烯纤维的增加先减小再增大, 在掺量为 1.8 kg/m³ 时达到最大值; 随着引气剂的增加先减小再增大, 在掺量为 0.005% 时达到最大值。[结论] 影响混凝土抗冲磨性能最为显著的因素是纳米二氧化硅掺量, 其次是聚丙烯纤维, 再次是微硅粉, 最后是引气剂。

关键词: 泥石流防治工程; 混凝土; 纳米二氧化硅; 正交试验; 抗冲磨强度

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2021)04-0113-08

中图分类号: X43, P642.23

文献参数: 方鑫, 陈晓清, 陈剑刚, 等. 泥石流防治工程混凝土材料的抗冲磨性能[J]. 水土保持通报, 2021, 41(4): 113-120. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2021.04.016; Fang Xin, Chen Xiaoqing, Chen Jiangang, et al. Properties of abrasion resistance of concrete for debris flow mitigation engineering [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(4): 113-120.

Properties of Abrasion Resistance of Concrete for Debris Flow Mitigation Engineering

Fang Xin^{1,2,3}, Chen Xiaoqing^{1,2,3}, Chen Jiangang^{1,2}, Zhao Wanyu^{1,2}

(1. Key Laboratory of Mountain Hazards and Earth Surface Process, CAS, Chengdu, Sichuan

610041, China; 2. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences,

Chengdu, Sichuan 610041, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: [Objective] Experiments on strengthening the abrasion resistance of mitigation engineering by mixing nano silica, micro silica powder, polypropylene fiber and other materials with concrete were carried out to discuss the laws of the influence of the mixing material content on the abrasion resistance, in order to provide scientific reference for the mix design of abrasion resistance of concrete in the debris flow mitigation engineering. [Methods] The underwater abrasive test of concrete specimens was carried out by using the underwater steel ball method (SL352-2006) designed by orthogonal experimental design method, and the abrasive resistance strength of concrete mixed with nano silica, micro silica and polypropylene fiber was obtained. [Results] Within the range of selected content, the abrasion resistance strength of concrete specimens increased first and then decreased with the raise of Nano-SiO₂, and reached the maximum value when the content was 1.5%. With the increase of microsilica powder, the maximum value was reached when the content was 12%. With the increase of polypropylene fiber, it decreased at first, and then increased, and the maximum value was reached when the content was 1.8 kg/m³. With the increase of air entraining agent, it first

收稿日期: 2021-02-24

修回日期: 2021-05-12

资助项目: 国家重点研发计划项目子课题“洪水冲击作用下村镇建筑结构动力破坏机理与建筑群遮掩效应”(2018YFD1100401); 中科院 A 类战略性先导科技专项课题“生态措施与工程措施协同的绿色减灾关键技术与示范”(XDA23090403)

第一作者: 方鑫(1979—), 男(汉族), 湖北省黄石市人, 硕士研究生, 研究方向泥石流防治工程抗冲磨材料。Email: 69711681@qq.com。

通讯作者: 陈晓清(1974—), 男(汉族), 四川省遂宁市人, 研究员, 博士生导师, 主要从事岩土工程方面的研究。Email: xqchen@imde.ac.cn。

decreased and then increased, and reached the maximum value when the dosage was 0.005%. [Conclusion] The most significant factor affecting the abrasion resistance strength of concrete is the content of nano silica, followed by polypropylene fiber, micro silica and air entraining agent.

Keywords: debris flow mitigation engineering; concrete; nano silica; orthogonal experimental design; abrasion-resistance strength

在汶川地震和极端暴雨事件的双重影响下,地震影响区域内的泥石流灾害发生频繁,呈现出持续性和群发性的特点。近年来,对泥石流灾害的起动机理、运动过程、监测预警、风险评价和防治措施等方面开展了深入的研究^[1-8]。同时为保障交通生命线的畅通和保护山区村镇人民生命财产的安全,修建了大量的泥石流防治工程。其中常见的防治工程型式包括:谷坊、拦砂坝、明洞、排导槽、渡槽等,这些工程通常会用到大量混凝土材料。20 世纪 70—90 年代,在铁路泥石流防治工程中,在溢流口等表面易受冲磨损伤的部位较多使用钢板、钢轨等做抗冲及耐磨材料,但其中大部分在经历多次泥石流冲磨后,抗冲磨性能仍不能完全满足要求。例如,为治理成昆线在四川省乐山市大瓦山南麓与汉源县的边界上的白熊沟泥石流,20 世纪 80 年代末修建的防治工程中,修建了全衬砌 V 型排导槽以加强泥石流的宣泄能力,为加强排导槽底的抗冲磨性能,在混凝土中掺入了钢板、钢轨等材料。现行的《泥石流防治工程设计规范(试行)(T/CAGHP021-2018)》中明确了用于保护铁路的泥石流防治工程的设计寿命一般按 50 a 考虑,而根据 2010 年(相距白熊沟防治工程建成仅 20 余年)对白熊沟的现场考察资料发现,发现该处的全衬砌 V 型排导槽在经历泥石流冲磨后,产生了较大的损伤,如图 1 所示。图 1 中 A 处显示了在槽底的预埋钢轨已被冲断;图 1 中 B 处显示的损伤,如再经历大规模泥石流作用,将有可能引发排导槽地板的揭底破坏,存在失效的风险隐患。

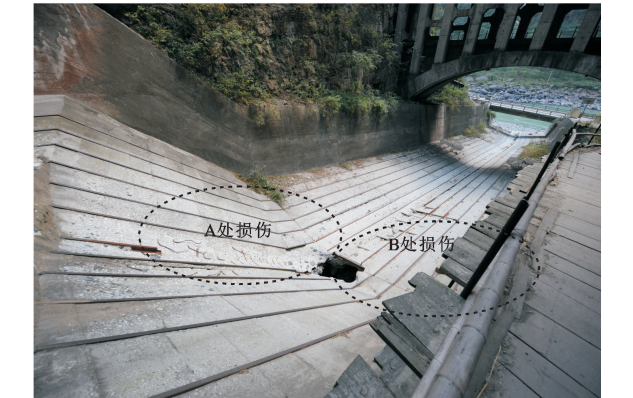


图 1 成昆线白熊沟 V 型排导槽破损现状

在现有的研究资料中,泥石流防治工程混凝土的抗冲磨性能研究还较少,如何获得力学性能稳定,且具有较高的抗冲磨强度的混凝土,一直是泥石流防治工程领域亟待解决的一个重要技术问题^[9]。图 2—3 为 2019 年 8 月泥石流对拦砂坝和排导槽造成的冲磨破坏。



图 2 2019 年 8 月泥石流对登溪沟拦砂坝的冲磨破坏



图 3 泥石流对汶川登溪沟排导槽底板的冲磨破坏(矩形槽底)

泥石流防治工程建筑物与泥石流接触的部位受到的作用力,一部分是泥石流整体对其的摩擦力,另一部分是流体中的岩石颗粒对其的冲击力,这两部分作用力共同导致了对建筑物结构表面的冲磨作用^[10]。在此作用下,混凝土表面不断有水泥微粒脱离,逐渐露出混凝土内部的粗骨料并形成粗糙表面。粗糙表面加大了摩擦系数和冲击角,导致冲磨力的增强,加速了水泥微粒的脱离。如此反复循环,混凝土损伤不断的积累导致强度降低,最终破坏建筑

物结构,严重影响泥石流防治工程的安全运行^[11]。因此混凝土的抗冲磨性能的优劣决定了泥石流防治工程能否长期稳定运行。

掺加纳米二氧化硅^[12-14]、微硅粉^[12,15]和聚丙烯纤维^[15-16]对提高混凝土抗冲磨性能有较好效果,聚丙烯纤维还能够提高混凝土的冲击韧性^[17],引气剂对改善混凝土内微结构,减少有害孔隙有积极作用,还可以提高混凝土的抗渗性和抗冻性,但混凝土强度会有轻微损失^[18]。为改善混凝土微结构,提高泥石流防治工程混凝土的抗冲磨性能,提出一种新的抗冲磨混凝土配合比设计思路:通过掺入纳米二氧化硅、微硅粉改善混凝土粗、细集料和水泥石之间的接触界面;通过掺入聚丙烯纤维提高混凝土接触界面的黏附力;通过引气剂改善混凝土内微结构、减少有害孔隙,提高混凝土的和易性,同时掺加上述 4 种材料以提高混凝土的整体抗冲磨性能。为此,开展了使用纳米二氧化硅和微硅粉等质量取代水泥、聚丙烯纤维质量掺量,并掺入引气剂的试验,通过混凝土表面受水下流动介质冲磨的相对抗力来评价混凝土的抗冲磨性能,筛选出显著影响混凝土抗冲磨强度的掺合材料,并识别出各掺合材料的最佳掺量水平,为泥石流防护工程建设中抗冲磨混凝土的配合比设计提供参考。

1 试验材料与方法

1.1 材料选取

纳米二氧化硅选用 ZEC 牌的气相纳米二氧化硅,比表面积 $200\pm 15\text{ m}^2/\text{g}$,一次粒径 15 nm ,松散密度 $0.1\text{ g}/\text{cm}^3$ 。微硅粉选用成都产的锦祥牌 94 型微硅粉,二氧化硅含量 94.5%。聚丙烯纤维选用束状单丝 15 mm 的聚丙烯纤维,密度为 $0.91\text{ g}/\text{cm}^3$ 。引气剂选用广东龙湖的 FLOTAGE AE-2 型引气剂。水泥选用成都产的 425 普通硅酸盐水泥,密度为 $3.1\text{ g}/\text{cm}^3$;细集料选用细度模数为 2.76 的中砂,密度为 $2.632\text{ g}/\text{cm}^3$,含水率为 2%;粗集料选用粒径 $5\sim 31.5\text{ mm}$ 连续级配的碎石,表观密度为 $2.685\text{ g}/\text{cm}^3$ 。因纳米二氧化硅比表面积大,吸水性强,选用聚羧酸系高效减水剂(减水率 21%),满足混凝土施工的和易性要求。

1.2 试验设计

在原材料不变的条件下,较小水胶比的混凝土密实程度较高,从而有较高的抗冲磨强度。又因为泥石流防治工程中使用的混凝土强度等级普遍在 C_{20} — C_{35} 之间,考虑到工程经济性,水灰比不宜定得过小,本试验选择固定水胶比为 0.4,配制强度等级 C_{25} 的混凝土。根据肖会刚等人^[19]的研究,纳米二氧化硅

和微硅粉在不同尺度范围上充当了细小填料,进一步完善了粗、细集料的级配,减少了影响抗冲磨性能的混凝土内部有害孔隙。为在相同的砂、石级配条件下比较纳米二氧化硅和微硅粉对混凝土抗冲磨强度的影响,选择了固定砂率 0.4。

选定的 4 因素 3 水平详见表 1。纳米二氧化硅的掺量参照唐明^[12]和 Nazari 等^[13]人的研究,选择 1%,1.5%和 2%;微硅粉的掺量参照唐明^[12]的研究,选择 8%,10%和 12%;聚丙烯纤维的掺量参照胡金生^[17]和周世华、石妍等人^[20]的研究,选择 0.6,1.2 和 $1.8\text{ kg}/\text{m}^3$;引气剂的掺量以生产厂家的推荐值为基础增加高水平 and 低水平,选择 0.005%,0.010%和 0.015%。

表 1 复掺材料混凝土的有关因素和水平

纳米二氧化硅掺量/% (因素 A)	微硅粉掺量/% (因素 B)	聚丙烯纤维掺量/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) (因素 C)	引气剂掺量/% (因素 D)
1.0	8	0.6	0.005
1.5	10	1.2	0.010
2.0	12	1.8	0.015

按照表 1 中各因素各水平值的选择,可以得到正交试验表(详见表 2)。

表 2 复掺材料混凝土正交试验参数

编号	纳米二氧化硅掺量/% (因素 A)	微硅粉掺量/% (因素 B)	聚丙烯纤维掺量/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) (因素 C)	引气剂掺量/% (因素 D)
试验 1	1.0	8	1.8	0.010
试验 2	1.0	10	0.6	0.015
试验 3	1.0	12	1.2	0.005
试验 4	1.5	8	0.6	0.005
试验 5	1.5	10	1.2	0.010
试验 6	1.5	12	1.8	0.015
试验 7	2.0	8	1.2	0.015
试验 8	2.0	10	1.8	0.005
试验 9	2.0	12	0.6	0.010

1.3 配合比设计

根据《普通混凝土配合比设计规程(JGJ55-2011)》,计算出初步配合比,并于 2019 年 8 月 19 日,在中铁二局第四工程有限公司工程检测中心实验室,进行了初步配合比的 4 次试拌调整。由研究资料^[21]得知,由于纳米二氧化硅的加入会使得水泥净浆的标准稠度需水量急剧上升,所配制出混凝土的坍落度将显著降低,因此在配制过程中不断试拌调整,选择使用

聚羧酸系高效减水剂,掺量选择 1.85%,以满足混凝土的工作性要求。最终配制的试验配合比详见表 3。通过该表所列数据配制的混凝土坍落度在 20~90 mm 不等,基本满足工作性要求。

表 3 复掺材料混凝土配合比

序号	水	水泥	中砂	碎石	减水剂	纳米二氧化硅	微硅粉	聚丙烯纤维	引气剂质量/kg
试验 1	170	387	685	1 028	7.863	4.250	34.0	1.8	0.106
试验 2	170	378	686	1 029	7.863	4.250	42.5	0.6	0.159
试验 3	170	370	685	1 027	7.863	4.250	51.0	1.2	0.053
试验 4	170	385	687	1 031	7.863	6.375	34.0	0.6	0.053
试验 5	170	376	686	1 029	7.863	6.375	42.5	1.2	0.106
试验 6	170	368	684	1 027	7.863	6.375	51.0	1.8	0.159
试验 7	170	383	686	1 029	7.863	8.500	34.0	1.2	0.159
试验 8	170	374	685	1 027	7.863	8.500	42.5	1.8	0.053
试验 9	170	366	686	1 028	7.863	8.500	51.0	0.6	0.106

1.4 混凝土试件制作

2019 年 8 月 20 日上午,仍在中铁二局四公司中心试验室,按试验 1 的配合比,使用内径 300 mm±2 mm,高 100 mm±1 mm 的试模,制作了 1 组 3 个符合《水工混凝土试验规程(SL352-2006)》要求的混凝土试件。在脱模之后,于 8 月 23 日运回中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所试验大厅常规养护,用于调试水下钢球冲磨试验机。2019 年 8 月 20 日下午至 22 日下午,按表 3 的配合比,在该实验室,使用标准试模,制作了每组 3 个共 9 组符合《水工混凝土试验规程(SL352-2006)》要求的混凝土试件,每组试件脱模后,均送入该中心试验室的养护室标准养护。8 月 23 日,最后一组试件脱模完毕送入养护室。所有试件标准养护 28 d 后,于 2019 年 9 月 20 日运至成都山地灾害与环境研究所试验大厅(图 4)。



图 4 完成养护待冲磨的 9 组试件

1.5 试验方法

在泥石流运动过程中,由于铺床作用^[22],减小了外部的阻力,也减小了防护工程结构体受到的摩擦力,因此当容重在一定范围内时,黏性泥石流比稀性

泥石流对建筑物表面混凝土的冲磨作用要小。本试验采用的水下钢球法是用叶轮带动水流高速流动,并挟带水中的钢球对试件表面进行冲磨,模拟了特定参数的泥石流的运动,对泥石流防治工程的耐久(磨)性设计具有一定的参考作用。按照《水工混凝土试验规程(SL352-2006)》中,水下钢球法冲磨试验的要求,抗冲磨性能指标以抗冲磨强度表示,按公式(1)计算,其数值越大说明抗冲磨性能越好。

$$R_a=\frac{TA}{M_T} \tag{1}$$

式中: R_a 为抗冲磨强度,即单位面积上被磨损单位质量所需的时间($\text{h}\cdot\text{m}^2/\text{kg}$); T 为试验累计时间(h); A 为试件受冲磨面积(m^2); M_T 为试件受冲磨 T 时段后,累计的损失质量(kg)。

在掺加了纳米二氧化硅和微硅粉的混凝土中,随着混凝土龄期的发展,水泥水化进程不断深入,活性二氧化硅微粒不断与水泥水化生成的氢氧化钙发生火山灰反应,将导致混凝土的抗压强度和劈裂抗拉强度随混凝土龄期发展而不断提高,陈永根的研究^[23]也印证了这一点。研究发现,56 d 龄期和 28 d 龄期的单掺硅灰的相变混凝土相比较,抗压强度增加了 14.17%,劈裂抗拉强度增加了 43.36%。大量前人研究表明^[24-25],混凝土抗压强度和抗冲磨强度存在正相关关系,即混凝土试件的抗压强度越大,抗冲磨强度也越大。而劈裂抗拉强度宏观反映的是混凝土中的胶凝材料的黏结力,此强度越高,说明胶凝材料与集料之间的黏结力越大,在冲磨过程中需要更长的时间来造成混凝土胶凝材料的质量损失,因此由抗冲磨强度的定义可知,劈裂抗拉强度与抗冲磨强度也存在正相关关系。基于以上原因,为尽量降低混凝土试件龄期过长,混凝土的抗压强度、劈裂抗拉强度增大对试

件抗冲磨强度的影响,避免试验结果受到较大干扰,参照《水工混凝土试验规程(SL352-2006)》标准试验方法,用冲磨 12 h 的质量损失,来定性描述各试件的抗冲磨强度。试验步骤为:①试验前,将试件在水盆中浸泡 48 h;②试验时,取出试件,擦去表面水分,称量试件冲磨前质量;③放好钢筒密封圈,底板上垫两根 $\phi 6$ mm 的钢筋后,将试件装至试验机中并对中,套上钢筒;④安装搅拌桨,使得桨底部距试件表面约 38 mm,调整转轴并和钢筒对中;⑤在钢筒内放入 10 个直径 25.4 ± 0.1 mm,35 个直径 19.1 ± 0.1 mm,25 个直径 12.7 ± 0.1 mm 的研磨钢球于试件表面,加水至水面高出试件表面 165 mm;⑥设定转轴转速 1 200 r/min,开机。⑦累计冲磨 12 h,取出试件,清洗干净并去除表面水分,称量试件冲磨后质量。

2019 年 9 月 30 日至 10 月 6 日,在中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所试验大厅,按照上述试验步骤,使用如图 5 所示的水下钢球试验机完成了各组试件的 12 h 冲磨试验。



图 5 水下钢球法试验装置

2 试验结果与分析

2.1 试验结果

试验开始前测量记录试件的初始质量,试验完成后测量记录试件累计冲磨 12 h 后的剩余质量,并计算抗冲磨强度一并填入(表 4)。冲磨试验后,试件如图 6 所示。

表 4 水下钢球法冲磨试验数据

编号	纳米二氧化硅/% (因素 A)	微硅粉/% (因素 B)	聚丙烯纤维/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) (因素 C)	引气剂/% (因素 D)	初始质量/ kg	剩余质量/ kg	冲磨时间/ h	抗冲磨强度/ ($\text{h} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$)
试验 1	1.0	8	1.8	0.010	14.667	13.769	12	0.94
试验 2	1.0	10	0.6	0.015	14.109	13.129	12	0.87
试验 3	1.0	12	1.2	0.005	14.712	13.958	12	1.12
试验 4	1.5	8	0.6	0.005	15.540	15.125	12	2.04
试验 5	1.5	10	1.2	0.010	14.547	13.955	12	1.43
试验 6	1.5	12	1.8	0.015	16.413	16.167	12	3.45
试验 7	2.0	8	1.2	0.015	15.498	14.594	12	0.94
试验 8	2.0	10	1.8	0.005	16.462	16.065	12	2.14
试验 9	2.0	12	0.6	0.010	15.624	15.097	12	1.61



图 6 经历 12 h 冲磨试验的一个试件

2.2 极差分析

极差分析法是正交试验结果分析中最常用的方

法,极差就是各因素、各水平的平均效果中最大值和最小值的差^[26],在本文中,各因素所对应的 K_i 为该因素第 i 个水平下三组试件抗冲磨强度的总和;各因素所对应的 \bar{K}_i 为该因素第 i 个水平下抗冲磨强度的均值;极差 R 为该因素 3 个水平的抗冲磨强度均值的极大值与极小值之差,它反映的是该因素不同水平下,抗冲磨强度值的变异范围和离散幅度。各因素的极差 R 值的大小用来衡量试验中相应因素的对试验结果影响作用的大小,极差值大的因素说明它的不同水平对试验结果的影响较大,通常是最重要的因素;而极差值小的因素则往往是次要因素。所以按照极差值的大小,可以排列出各因素的主、次顺序,并可以帮助确定各因素最佳水平的组合^[27]。按照极差分析法,将计算结果填入表 5。

表 5 冲磨试验数据极差分析结果

编 号	纳米二氧化硅/% (因素 A)	微硅粉/% (因素 B)	聚丙烯纤维/(kg·m ⁻³) (因素 C)	引气剂/% (因素 D)	抗冲磨强度/ (h·m ² ·kg ⁻¹)
试验 1	1.0	8	1.8	0.010	0.94
试验 2	1.0	10	0.6	0.015	0.87
试验 3	1.0	12	1.2	0.005	1.12
试验 4	1.5	8	0.6	0.005	2.04
试验 5	1.5	10	1.2	0.010	1.43
试验 6	1.5	12	1.8	0.015	3.45
试验 7	2.0	8	1.2	0.015	0.94
试验 8	2.0	10	1.8	0.005	2.14
试验 9	2.0	12	0.6	0.010	1.61
K ₁	2.930	3.920	4.520	5.300	
K ₂	6.920	4.440	3.490	3.980	
K ₃	4.690	6.180	6.530	5.260	
\bar{K}_1	0.977	1.307	1.507	1.767	
\bar{K}_2	2.307	1.480	1.163	1.327	
\bar{K}_3	1.563	2.060	2.177	1.753	
极差 R	1.330	0.753	1.014	0.440	

对表 5 中的数据,应用极差法进行分析,可以得到:①本次正交试验各因素对应的极差 R 值从大到小的顺序为: $A>C>B>D$,也即各因素影响混凝土抗冲磨强度的主次顺序。可见纳米二氧化硅掺量是影响混凝土试件抗冲磨强度的主要因素,其次为聚丙烯纤维,再次是微硅粉,最后是引气剂。②因素 A 所在列的 K_2 在该列中最大,说明因素 A 选择第 2 个水平比其余两个水平好,同理可以得到因素 B 的第 3 个水平、因素 C 的第 3 个水平,因素 D 的第 1 个水平比其余的水平好,因此得到最佳的试验条件为: $A_2B_3C_3D_1$ 。也即当纳米二氧化硅掺量为 1.5%,微硅粉掺量为 12%,聚丙烯纤维掺量为 1.8 kg/m³,引气剂掺量为 0.005%时,所配制的抗冲磨混凝土具有较高的抗冲磨强度。

2.3 纳米二氧化硅掺量对抗冲磨强度的影响

纳米二氧化硅颗粒直径一般在 1~100 nm,比表面积可达 150~300 m²/g,表面有大量不饱和 Si-O 残键及不同键合状态的羟基,因表面欠氧而偏离了稳态的硅氧结构,从而具有高反应活性^[28]。纳米二氧化硅颗粒掺入到混凝土中以后,通过与水泥水化生成的 Ca(OH)₂ 发生火山灰反应,加速硅酸三钙(C₃S)的溶解,并为硅酸钙水合物(C-S-H)提供成核位置加速 C-S-H 的生成^[29],改善了胶凝材料与集料的界面结构,极大降低了水化产物中 Ca(OH)₂ 的含量,在胶凝材料中生成了更多的钙矾石,提高了水泥石的密实程度,减少了影响混凝土强度的有害孔隙,从而能够有效提高混凝土的抗压强度。由于 C-S-H 凝胶的生成

需要大量水参与反应,掺入纳米二氧化硅后,需水量将大大增加。如果纳米二氧化硅掺量过高,一是可能导致用水量不足,水泥水化不充分,降低混凝土的抗压强度;二是可能大大增加了用水量,混凝土硬化产生强度后,未参与水化反应和火山灰反应的水分逸散后留下的有害孔隙将大量增加,降低混凝土的抗压强度。基于上述分析,从抗冲磨强度与抗压强度的正相关关系来看,掺加合适含量的纳米二氧化硅能提高混凝土的抗冲磨强度,但掺量过高将降低混凝土的抗冲磨强度。由试验结果可以看到,纳米二氧化硅(因素 A)对应的不同掺量水平的 K 值有以下关系: $K_2>K_3>K_1$,这说明纳米二氧化硅的掺量不是越高越好,当掺量超过一定比例后混凝土的抗冲磨强度反而会降低,和分析结论一致。

2.4 微硅粉掺量对抗冲磨强度的影响

微硅粉颗粒的平均粒径在 0.1~0.3 μm,比表面积为 20~28 m²/g,细度和比表面积约为水泥的 80~100 倍,粉煤灰的 50~70 倍。微硅粉掺入到混凝土中以后,与纳米二氧化硅相类似,其中的活性二氧化硅颗粒也能够和水泥水化产物中的 Ca(OH)₂ 发生火山灰反应,改善胶凝材料与集料的界面结构,提高混凝土抗压强度,从而提高抗冲磨强度。

由试验结果,可以看到微硅粉(因素 B)对应的不同掺量水平的 K 值有以下关系: $K_3>K_2>K_1$,说明在选择的掺量范围内,掺入微硅粉以后,混凝土的抗冲磨强度随微硅粉掺量的增加而增加。但微硅粉掺量过高将可能造成替换的水泥过多,参加水化反应的

水泥颗粒不足,导致混凝土的力学强度降低,最终影响混凝土抗冲磨强度。综合防治工程建设的经济性考虑,在抗冲磨混凝土配合比设计时可在10%~12%中选定实际掺加量。

2.5 聚丙烯纤维掺量对抗冲磨强度的影响

聚丙烯纤维质量轻,纤维直径小。掺加聚丙烯纤维后,在混凝土强度发展的早期阶段,纤维在混凝土中呈均匀乱向分布相互交叉搭接,抑制了混凝土的粗骨料下沉,不但减少结构缺陷、提高了混凝土的均匀性,还能通过阻断逸出通道减少水分的散失^[30]。混凝土硬化形成稳定结构后,由于纤维与混凝土中胶凝材料基体之间的黏结强度较高,纤维本身也有一定的塑性,对混凝土结构具有一定的约束作用,又因为在混凝土受到冲磨时,纤维在混凝土中的杂乱分布有利于将冲磨面受到的荷载传导到未受冲磨的部分,因此冲磨力需要克服这些约束作用后才会使混凝土发生磨损,这使混凝土整体的抗冲磨强度得到了一定程度的提高。由试验结果可以看到,聚丙烯纤维(因素C)对应的不同掺量水平的 K 值有以下关系: $K_3 > K_1 > K_2$ 。表明在掺入聚丙烯纤维后,混凝土的抗冲磨强度随聚丙烯纤维的掺量增加先降低后升高。这是因为在纤维掺量水平较低时,还未在混凝土中广泛形成相互交叉搭接的网状结构,在这个阶段,掺入的纤维是作为影响混凝土力学性能的杂质存在,因此混凝土抗冲磨强度随掺量的增加而降低;而掺量达到一定水平后,网状结构开始广泛形成,随着纤维掺量的增加,约束作用的不断增强,混凝土抗冲磨强度也开始不断增强。因此在抗冲磨混凝土的配合比设计中,每方混凝土的聚丙烯纤维掺量可选择在1.8 kg左右,并通过进一步的试配试验确定其抗压强度、抗冲磨强度及经济性是否满足设计要求。

2.6 引气剂掺量对抗冲磨强度的影响

由于混凝土在搅拌时将空气带入到混凝土浆体内,容易形成一些大小不一,不均匀的气泡。混凝土硬化后,部分气泡在混凝土内形成密闭空腔,成为结构缺陷,气泡直径、气泡间距等参数直接影响了混凝土强度。引气剂是一种憎水性表面活性剂,溶于水后加入混凝土拌合物内,在搅拌过程中可以使混凝土搅拌时产生的气泡直径大大减少,分布均匀,还能提高混凝土的和易性。掺入引气剂后增加了混凝土的孔隙率,随着引气剂掺量的变化,混凝土的力学强度、抗冲磨性能均会受到影响。由于掺加的纳米二氧化硅需水量大,混凝土搅拌时和易性和工作性不好,为解决这一困难,需要加入少量引气剂。由试验结果可以看到,引气剂(因素D)对应的不同掺量水平的 K 值有以下

关系: $K_1 > K_3 > K_2$ 。掺入引气剂后随着引气剂掺量的增加,混凝土抗冲磨强度先减小后增加。需要注意的是,引气剂不宜掺入过多,而试验结果显示,4个因素中引气剂的影响最不显著,因此在防护工程的抗冲磨混凝土配合比设计时,引气剂的掺量可选择0.005%。

3 结论

通过正交试验设计,选择纳米二氧化硅、微硅粉、聚丙烯纤维、引气剂的不同掺量水平,分组配制成抗冲磨混凝土试件后,使用水下钢球试验法对各试件进行了冲磨试验,并对试验结果进行了分析,复掺纳米二氧化硅、微硅粉、聚丙烯纤维、引气剂时,最合适的掺量分别是为1.5%,12%,1.8 kg/m³,0.005%。本试验得出的结果反映了C₂₅强度的混凝土试件抵抗特定的流速、容重、最大粒径、固体颗粒配比的固液两相流体连续冲磨的能力,缺乏普适性,只是定性表征了混凝土材料在此类流体下的抗冲磨能力,为泥石流防治工程中抗冲磨混凝土配合比的设计提供了一些思路。需要注意的是在泥石流防治工程的混凝土设计中,不仅需要按照所在防治地区发生过的泥石流的运动特征参数作进一步的现场或模拟冲磨试验,验证所设计混凝土的实际抗冲磨能力是否能满足设计要求,还应进行力学强度、冲击韧性等试验,验证其力学性能是否满足结构稳定性的要求。

【参考文献】

- [1] 王之君,李仁年,拓万全.基于历史观测数据的泥石流突变启动模式研究:以陇南山区白龙江流域为例[J].灾害学,2019,34(2):140-144.
- [2] 安笑,潘华利,欧国强,等.恒定渗流作用泥石流碎屑物质启动判别模型研究[J].岩土力学,2020,41(S1):115-122.
- [3] 雷鸣宇,崔一飞,倪钧钧,等.浅层滑坡型火后泥石流启动机理研究进展与案例分析[J].工程地质学报,2021,29(3):786-797.
- [4] 李睿祺,胡桂胜,杨志全,等.都汶高速公路银杏坪沟大规模泥石流运动特征与堵溃分析[J].成都理工大学学报(自然科学版),2020,47(5):625-634.
- [5] 栗帅,陈晓清,陈剑刚,等.“阶梯+消力墩”型排导槽调控泥石流性能研究[J].工程科学与技术,2021,53(3):68-76.
- [6] 毕远宏,丛凯.基于小流域暴雨洪峰理论的泥石流汇流模拟:以马家沟泥石流为例[J].甘肃地质,2020,29(Z1):73-78.
- [7] 陈亮,刘珍,肖捷.云南省新平县那板箐泥石流发育特征及风险评价[J].地质灾害与环境保护,2020,31(1):17-22.
- [8] 徐根祺,温宗周,李丽敏,等.监测预警技术在泥石流灾害中的应用研究[J/OL].有色金属科学与工程:1-9. (2021-

- 05-05)[2021-04-30].
- [9] Chen Jiangang, Chen Xiaoqing, Wang Tao, et al. Types and causes of debris flow damage to drainage channels in the Wenchuan Earthquake area [J]. Journal of Mountain Science, 2014, 11(6): 1406-1419.
 - [10] 周富春, 黄本生, 杨钢, 等. 稀性泥石流对排导槽的冲磨破坏机理[J]. 山地学报, 2001, 19(5): 470-473.
 - [11] 李光宇, 张海燕, 曹四伟. 水工混凝土抗冲磨材料的应用进展[J]. 路基工程, 2009(2): 165-166.
 - [12] 唐明, 巴恒静, 李颖. 纳米级 SiO_x 与硅灰对水泥基材料的复合改性效应研究[J]. 硅酸盐学报, 2003(5): 523-527.
 - [13] Nazari Ali, Riahi Shadi. Compressive strength and abrasion resistance of concrete containing SiO_2 and Cr_2O_3 nanoparticles in different curing media [J]. Magazine of Concrete Research, 2012, 64(2): 177-188.
 - [14] 陈安生, 唐小萍. 纳米 SiO_2 对不同强度等级混凝土性能的影响[J]. 硅酸盐通报, 2013, 32(8): 1521-1527.
 - [15] Cheng An, Lin Weiting. Abrasion resistance of concrete containing polyolefin fibers and silica fumes [J]. Polymers and Polymer Composites, 2014, 22(5): 437-442.
 - [16] Zoran J G, Gordana A T C, Nenad S R, et al. Abrasion resistance of concrete micro-reinforced with polypropylene fibers [J]. Construction and Building Materials, 2012, 27(1): 305-312.
 - [17] 胡金生, 杨秀敏, 周早生, 等. 钢纤维混凝土与聚丙烯纤维混凝土材料冲击荷载下纤维增韧特性试验研究[J]. 建筑结构学报, 2005, 26(2): 101-105.
 - [18] 张文平. 新型混凝土引气剂和防冻剂研究[D]. 辽宁 大连: 大连理工大学, 2006.
 - [19] Xiao Huigang, Liu Rui, Zhang Fengling, et al. Role of nano- SiO_2 in improving the microstructure and impermeability of concrete with different aggregate gradations [J]. Construction and Building Materials, 2018, 188: 537-545.
 - [20] Wang L, Zhou S H, Shi Y, et al. Effect of silica fume and PVA fiber on the abrasion resistance and volume stability of concrete [J]. Composites Part (B), 2017, 130: 28-37.
 - [21] 徐迅, 卢忠远. 纳米二氧化硅对硅酸盐水泥水化硬化的影响[J]. 硅酸盐学报, 2007, 35(4): 478-484.
 - [22] 崔鹏, 唐金波, 林鹏智. 泥石流运动阻力特性及其研究进展[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2016, 48(3): 1-11.
 - [23] 陈永根. 龄期对不同掺料相变混凝土力学性能影响试验与分析[J]. 湖南文理学院学报(自然科学版), 2019, 31(4): 53-57, 63.
 - [24] 邓明枫, 钟强, 张立勇, 等. 高性能混凝土抗冲磨性能试验研究[J]. 混凝土, 2008(2): 82-83, 86.
 - [25] 赵正, 刘健, 徐晶, 等. 超高性能纤维增强水泥基复合材料的抗冲磨性能研究[J]. 河北工业大学学报, 2015, 44(6): 108-111.
 - [26] 孙玲玲. 基于 QFD 和 DOE 的产品优化设计研究[D]. 浙江 杭州: 浙江大学, 2011.
 - [27] 唐佳丽, 徐章韬. 正交试验中的极差分析与方差分析[J]. 中学数学, 2017(9): 31-34.
 - [28] 张密林, 丁立国, 景晓燕, 等. 纳米二氧化硅的制备、改性与应用[J]. 化学工程师, 2003(6): 11-14.
 - [29] Jo Byungwan, Kim Changhyun, Lim Jaehoon. Investigations on the development of powder concrete with nano- SiO_2 particles [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2007, 11(1): 37-42.
 - [30] 梁宁慧. 多尺度聚丙烯纤维混凝土力学性能试验和拉压损伤本构模型研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.