

论纳米材料对喷射混凝土性能的影响研究

罗 焯

(中铁建大桥工程局集团第五工程有限公司, 四川 成都 610500)

摘要: 纳米材料由于具有特殊性能而被誉为 21 世纪的新型材料, 其应用领域广泛, 在高耐久性混凝土和高性能混凝土中得到发展, 在新时代的发展中, 将纳米材料作为一种掺加料引入到混凝土的拌和过程中从而改善混凝土的各方面性能是近年来的研究热点。本文简要描述纳米材料的特性, 主要讨论纳米材料对喷射混凝土性能的影响。

关键词: 纳米材料; 配合比设计; 混凝土性能; 试验成果

中图分类号: TB31/39; TV544+.923; TM401+.2 **文献标识码:** B **文章编号:** 1001-2184(2019)增 2-0128-04

Effect Study of Nano Materials on the Performance of Shotcrete

LUO Xuan

(The 5th Engineering Co., LTD, CRCC, Chengdu, Sichuan, 610500)

Abstract: Nano materials are known as new materials in the 21st century because of their special properties. They are widely used and developed in high durability concrete and high performance concrete. In the development of the new era, it is a research hotspot in recent years to introduce nano materials into the mixing process of concrete to improve the performance of concrete. In this paper, the characteristics of nano materials are briefly described, and the influence of nano materials on the performance of shotcrete is mainly discussed.

Key words: nano materials; mixing ratio design; concrete performance; test results

0 引言

喷射混凝土由于其特殊的施工工艺, 国内喷射混凝土常常出现许多问题。首先回弹率大, 干喷混凝土回弹率大约在 20~40%, 湿喷混凝土在 15~25%; 初期强度不足, 在水电行业, 对于喷射混凝土的 1 d 以内的强度未有关注, 尤其是抵抗掌子面的爆破扰动影响能力; 后期强度不足, 大多数湿喷混凝土采用碱性液体速凝剂, 速凝剂的 28 d 抗压强度比多为 70%, 仅为规范下限值, 再加上施工因素, 往往 28 d 强度仅为达到设计强度甚至低于设计值; 普通喷射混凝土的抗渗等级大多在 W6 以下, 在渗水较严重的地区难以抵抗渗水; 抗冻等级在 F100 左右, 在高寒地区易造成冻融破坏, 减少结构寿命。

纳米级改性掺合料往往对喷射混凝土此类问题的改善有很好的效果。文献调研一种 HB7-2 喷射混凝土纳米材料, 可见回弹率降低 60% 以

上, 1 d 强度提高 50% 以上, 28 d 混凝土强度提高 1~2 个强度等级, 一次喷射厚度可达 50 cm^[1]。在锦屏水电站引水隧洞中一种 XPM 纳米外加剂, 同样对混凝土的强度、回弹率、一次喷射厚度上均有所改善^[2]。为此可借鉴类似材料在双江口水电站进行应用研究, 为工程提供一种高效高性能新材料。尤其是在双江口水电站某些部位处于高地应力区, 研究该材料在混凝土中的作用是有必要的。

1 原材料

水泥为四川都江堰拉法基 P.O42.5, 比表面积为 350 m²/kg, 初凝时间为 209 min, 终凝时间 289 min, 3 d 抗压强度 30.8 MPa, 28 d 抗压强度为 49.1 MPa。

粗骨料为阿坝州双江口晓龙砂石供应有限公司生产的花岗岩、粒径 5~10 mm 为人工碎石, 表观密度为 2 760 kg/m³, 吸水率为 0.6%, 骨料级配见表 1, 筛分结果看出粗骨料的小于 4.75

收稿日期: 2019-09-14

表 1 粗骨料级配

公称粒径 /mm	31.5	26.5	19	16	9.5	4.75	2.36	1.16	
检测结果	累计筛余 /%	—	—	—	0.0	6.6	78.4	94.5	96.2

mm 部分的含量占据 22%，该部分主要集中于 2.36~4.75 mm，粗骨料级配较差。

细骨料为阿坝州双江口晓龙砂石供应有限公司生产的花岗岩人工砂，表观密度为 2 680 kg/

m³，坚固性为 2%，饱和面干吸水率为 2.0%，石粉含量为 13.3%，细度模数为 2.8，砂级配见表 2，可见该人工砂级配良好。

减水剂为山西黄恒科技有限公司生产的 YH

表 2 细骨料级配

筛孔尺寸 /mm	5	2.5	1.25	0.63	0.315	0.16
累计筛余 /%	5.6	29.3	43.0	57.2	77.6	88.0

—A 聚羧酸高性能减水剂(标准型)，掺量为 0.9%，减水率为 26.4%，含气量为 1.8%，坍落度 1h 经时变化量为 40 mm，可见该减水剂的坍落度损失接近规范上限值。

速凝剂为山西黄恒科技有限公司生产的 YH—VD2 液态速凝剂，掺量为 5%，初凝时间 3 min；35 s，终凝时间 8 min；40 s，1 d 抗压强度 11.8 MPa，28 d 抗压强度比为 77%，可见该速凝剂为合格品，28 d 抗压强度比接近规范规定下限值。

纳米材料为成都东蓝星新材料有限公司生

产、水电七局试验检测研究院研发与监制的 HB7—2W 型纳米材料，粒径 150~250 nm，减水率为 30%，坍落度 1 h 经时变化了为 30 mm，3 d 抗压强度比为 178%，28 d 抗压强度比为 160%。

2 室内配合比设计及硬化混凝土性能

2.1 喷射混凝土设计指标

喷射混凝土设计指标见表 3，考虑到湿喷混凝土的湿喷台车性能、湿喷混凝土坍落度损失、混凝土可泵性等，实际坍落度控制值为 160~200 mm。

表 3 喷射混凝土设计指标

序号	强度等级	混凝土类型	级配	设计坍落度 /mm	设计龄期 /d	28 d 配制强度 /MPa
1	C25	喷射	一级	80~120	28	32.4

2.2 混凝土拌和物性能及硬化混凝土性能

室内试验采用经验 C₂₅ 普通水泥喷射混凝土配合比与掺 6%、8%、10% 的纳米材料优化配合比进行对比，采用双轴卧式搅拌机，搅拌时间为 120 s，单方搅拌量 25L。凝结时间与混凝土成型均掺入 5% 液体速凝剂，其中凝结时间测试采用手感法以按着吃力时间为初凝时间，基本按不动时间为终凝时间。混凝土在人为压力下振动成型，从加入速凝剂到成型完成整个时间不超过 1 min。拌和物性能与硬化混凝土性能见表 4~6。

从拌和物性能结果表看出，掺入 6~10% 的纳米材料复合液体减水剂，可将单方用水量减少 20~25 kg，单方总胶材用量减少 40~90 kg，并且拌和物性能并无不利影响。随着纳米材料的增加，同水胶比凝结时间缩短 10~15%，在 6~10% 纳米材料掺量 0.43~0.52 水胶比下凝结时间均优于 0.43 普通水泥喷射混凝土。从硬化混凝土

结果看出，在 6%~8% 纳米材料掺量同水胶比较普通喷射混凝土 1 d 高约 25~30%，7 d 强度高约 10~15%，28d 强度高约 30~35%，且在 0.52 水胶比基本与 0.43 水胶比的普通喷射混凝土抗压强度持平；而在 10% 纳米材料掺量下，0.47 水胶比情况下较 0.43 水胶比的普通喷射混凝土 1d 强度高 31%，7d 强度高 15%，28d 强度高 22%；抗折强度掺入 6~10% 纳米材料，在 0.42~0.57 水胶比情况下均优于普通喷射混凝土。可见在 6%~10% 的纳米材料掺量下，在与普通混凝土水胶比相同情况下可提高 1~2 个强度等级。

3 现场工艺性试验成果

3.1 工艺性试验工作面情况及施工参数

工艺性试验选择在溢洪道某段进行，围岩为 III 类围岩，岩石主要以花岗岩为主，设有钢筋网(φ6.5@15 cm×15 cm)。设计喷射厚度为 5~7 cm。按照 GB 50086、DL/T 5181 中的施工技术要求进行喷射，相关施工参数见表 7。

表 4 混凝土拌和参数

试验编号	水胶比	砂率 /%	纳米材料掺量 /%	材料用量 / $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$					
				水	减水剂	纳米材料	水泥	砂	小石
SPN0	0.43	51	0	186	4.33	—	433	898	863
SPN1	0.42	60	6	166	3.42	23.7	372	1 079	720
SPN2	0.47	61	6	164	3.40	20.4	328	1 134	726
SPN3	0.52	62	6	162	3.08	18.0	287	1 176	721
SPN4	0.42	60	8	164	3.42	31.0	359	1 084	722
SPN5	0.47	61	8	162	3.06	28.0	317	1 132	724
SPN6	0.52	62	8	160	2.77	24.6	283	1 175	722
SPN7	0.42	60	10	160	3.42	38.0	342	1 081	721
SPN8	0.47	61	10	162	3.06	34.5	310	1 132	724
SPN9	0.52	62	10	160	2.77	30.8	277	1 176	721
SPN10	0.57	63	10	160	2.52	28.0	252	1 211	712

表 5 各配比拌和物性能结果

试验编号	用水量 / $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	坍落度 /mm		扩散度 /mm		含气量 /%		实测容重 / $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	凝结时间	
		0 h	1 h	0 h	1 h	0 h	1 h		初凝 (min : s)	终凝 (min : s)
SPN0	186	180	170	285	2 385	2.1	1.7	2 385	4 : 26	10 : 17
SPN1	166	180	170	340	2 420	2.6	2.2	2 420	4 : 05	9 : 19
SPN2	164	175	170	355	2 400	2.5	2.2	2 400	4 : 12	9 : 24
SPN3	162	180	175	325	2 400	2.5	2.4	2 400	4 : 21	9 : 28
SPN4	164	185	180	300	2 410	2.8	2.3	2 410	3 : 41	8 : 45
SPN5	162	180	175	310	2 400	2.7	2.5	2 400	3 : 50	8 : 50
SPN6	160	180	175	300	2 390	2.4	2.1	2 390	3 : 57	8 : 57
SPN7	160	185	180	360	2 410	3.0	2.5	2 410	3 : 15	8 : 02
SPN8	162	180	180	350	2 400	2.8	1.5	2 400	3 : 22	8 : 10
SPN9	160	190	185	360	2 420	2.9	2.4	2 420	3 : 31	8 : 16
SPN10	160	185	185	350	350	3.0	2.6	2 395	3 : 37	8 : 22

表 6 硬化混凝土性能

试验编号	水胶比	抗压强度 /MPa			抗折强度 /MPa
		1 d	7 d	28 d	
SPN0	0.43	10.8	28.9	33.4	6.15
SPN1	0.42	13.1	33.8	43.1	7.24
SPN2	0.47	11.5	31.7	36.4	7.11
SPN3	0.52	9.9	27.5	30.5	7.02
SPN4	0.42	15.0	33.2	44.4	7.90
SPN5	0.47	13.9	30.4	38.1	7.44
SPN6	0.52	11.2	28.6	33.8	6.83
SPN7	0.42	16.4	36.9	45.1	8.58
SPN8	0.47	14.2	33.4	40.3	7.53
SPN9	0.52	12.4	30.3	36.9	7.34
SPN11	0.57	10.4	26.6	31.2	6.55

表 7 工作面施工参数

围岩类别	断面形状及尺寸	喷射机械型号	风压 /MPa	喷射距离 /m	喷射角度 /°	一次喷射厚度 /mm
Ⅲ			5.0	1.2~1.5	80~90	50~70

混凝土采用拌和楼集中拌和,每次搅拌方量为 5 m^3 ,采用罐车运输,运输距离为 2.0 km ,运输时间约为 20 min 。速凝剂为现场机械添加,掺量为 5% 。

3.2 工艺性试验施工配合比及应用效果

纳米材料采用 8% 、 10% 掺量,并与普通喷射混凝土做对比试验,相关配合比参数及试验成果见表 8~9。

表 8 工艺性试验配合比参数

试验编号	水胶比	砂率 /%	材料用量 / $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$					
			水	减水剂	纳米材料	水泥	砂	小石
SPN0	0.43	51	186	4.33	—	433	898	863
SPN4	0.42	60	164	3.42	31.0	359	1 084	722
SPN5	0.47	61	162	3.06	28.0	317	1 132	724
SPN6	0.52	62	160	2.77	24.6	283	1 175	722
SPN7	0.42	60	160	3.42	38.0	342	1 090	728
SPN8	0.47	61	162	3.06	34.5	310	1 132	724
SPN9	0.52	62	160	2.77	30.8	277	1 176	721
SPN11	0.43	60	160	3.35	37.0	335	1 095	731

表 9 混凝土性能及现场应用效果

试验编号	黏结强度 /MPa		抗压强度 /MPa		抗折强度 /MPa		抗渗等级	抗冻等级	回弹率 /%
	28 d	1 d	7 d	28 d	28 d	28 d	28 d		
SPN0	1.0	10.9	21.4	28.6	5.51	≥ 6	$> \text{F50}$	20.0	
SPN4	1.8	13.6	22.9	30.2	5.50	≥ 10	$> \text{F100}$	11.6	
SPN5	1.6	12.2	18.9	24.9	5.36	≥ 10	$> \text{F100}$	14.2	
SPN6	1.5	10.9	15.1	19.2	5.01	≥ 10	$> \text{F100}$	15.8	
SPN7	2.4	14.5	29.9	35.5	5.96	≥ 10	$> \text{F100}$	8.0	
SPN8	2.2	13.2	21.6	27.9	5.65	≥ 10	$> \text{F100}$	10.4	
SPN9	2.1	12.1	17.3	20.8	5.47	≥ 10	$> \text{F100}$	12.0	
SPN11	2.4	14.1	28.6	32.7	5.90	≥ 10	$> \text{F100}$	8.4	

混凝土抗压强度、抗冻性、黏结强度,均采用喷射大板切割方式,抗压强度尺寸为 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$,抗冻等级试件切割成 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$ 的试件;黏结强度采用劈拉法,试件成型时大板底部放置一块厚度为不小于 65 mm 的岩石,再喷射混凝土,岩石与混凝土总厚度不少于 130 mm , 7 d 内切割成 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的试件,岩石与混凝土应各占一半。抗渗等级试件采用大板成型,钻芯出直径为 150 mm 的圆柱体试件,高度以抗渗试模高度一致,在钻芯出来后放在抗渗试模中,周围浇筑强度不低于喷射混凝土设计强度的密实砂浆,再进行抗渗试验。混凝土回弹率采用现场完全收集

称量的方式计算。

从试验结果可知,在同水胶比情况下,掺 8% 、 10% 纳米材料 1 d 较普通喷射混凝土分别高出 25% 、 30% , 28 d 强度高出 5% 、 25% ,可见在 10% 纳米材料掺量使混凝土强度大幅提高;及时在 0.47 水胶比掺入 $8\sim 10\%$ 纳米材料依然能够满足配制强度。

从黏结强度结果可知,掺入 $8\sim 10\%$ 纳米材料,黏结强度提高 80% 以上,尤其在 0.42 水胶比 10% 纳米材料掺量情况下,黏结强度较 0.43 水胶比普通喷射混凝土黏结强度要提高 140% 。

从耐久性可知,掺入纳米材料 $8\sim 10\%$ 后在

(下转第 137 页)

研究的运用,对双江口防渗墙施工具有实用性,保障了双江口水电站顺利完成上下游围堰防渗墙施工,确保了双江口水电站的安全度汛和大坝工程填筑如期进行。

7 结 语

随着我国经济的迅速发展,随着近年来水利、公路、铁路的基础设施不断建设,随着基础处理施工技术的不断提高,已越来越普遍采用防渗墙的方式进行地基处理。尽管防渗墙施工在我国水电工程实践中取得了一系列的成果,但在恶劣的环境和复杂的地质环境条件下,工程投资、施工工期、质量已经成为关系整个电站总投资、总进度和工程蓄水安全的重要因素之一。防渗墙施工与地质环境的相关理论、复杂地层的钻进工艺,在孤石巨漂密集地层、倒悬体及陡坎处理措施工艺等的研究仍显不足,在很大程度上制约了防渗墙施工技术的发展。双江口水电站围堰防渗墙的施工难度极大,本工程地层中所含的巨漂孤石(直径 15 m),倒悬体(埋深 17.5 m、厚度 2.5 m)、岸坡陡坎(落差 35~40 m),防渗墙孔深(最深 75.95 m)在

(上接第 131 页)

0.43~0.52 水胶比,抗渗等级较 0.43 普通喷射混凝土提高 4 个以上,抗冻等级提高 50 个冻融循环以上。这可能主要是由于掺入纳米材料后混凝土的密实性得到提高,水化产物的强度更高所致。

从回弹率测试结果可以看出,掺入 8~10% 的纳米材料后,回弹率均较普通喷射混凝土低,在 0.43 的水胶比 10% 纳米材料的掺量时,较同水胶比普通喷射混凝土降低幅度达 60% 以上,这有利于减少混凝土材料的浪费和喷射时间。

4 结 语

从纳米材料的室内与现场工艺性试验结果看,掺入 8~10% 的 HB7-2W 型纳米材料,主要有以下优势:

(1)混凝土初期强度提高在 30% 以上,有利于混凝土抵抗外界扰动能力,尤其是在掌子面受连续爆破影响的高地应力地区,喷射混凝土初期强度高,对于刚爆破的工作面抵抗地应力的能力越强。

(2)混凝土的黏结强度、后期强度、耐久性提高数个等级,提高整个支护结构的寿命,增

加安全性。

参考文献:

- [1] 高钟璞等.大坝基础防渗墙[M].北京:中国电力出版社,2000.
- [2] DLT5199-2004 水电水利工程混凝土防渗墙施工规范.
- [3] 水利水电工程混凝土防渗墙施工技术规范. SL174-96[S].北京:中国电力出版社,1996.
- [4] 丛蒿森.地下连续墙的设计施工与应用[M].北京:中国水利水电出版社,2002.
- [5] 水利水电工程施工组织设计手册(第三卷施工技术[S]).水利电力部水利水电建设总局——北京:水利电力出版社,1987.

作者简介:

- 田 彬(1969-),男,重庆人,正高级工程师,大学本科,项目经理,主要从事基础处理工程;
- 何 焯(1986-),男,藏族,四川成都人,工程师,大学本科,项目总工,主要从事基础处理工程;
- 康向文(1981-),男,湖南新化人,高级工程师,硕士,主任工程师,主要从事水电工程建设项目及技术管理工作。

(责任编辑:卓政昌)

加安全性。

混凝土回弹率降低 60% 以上,减少材料的浪费,提高施工效率,可节约整个支护造价。

参考文献:

- [1] 丁建彤,吴勇,雷英强.纳米材料改善普通干湿喷射混凝土回弹率和强度现场工艺试验[J].水力发电,2017,43(9):49-52.
- [2] 黄秋丽,武选正.XPM 纳米材料在锦屏水电站辅助洞工程喷混凝土中的应用[J].四川水力发电,2013,32(b12):117-119.
- [3] 郑康,李勇,马丽静,朱京鸣,崔平,唐允彦.纳米材料改性聚丙烯土工材料的研究[A].全国第六届土工合成材料学术会议论文集[C].2004 年.
- [4] 李国华.纳米材料对混凝土耐久性的影响[D].西南交通大学,2006 年.
- [5] 何登良,董发勤,邓跃全.纳米技术在建筑材料领域的应用[J].混凝土,2005 年 08 期.

作者简介:

- 罗 焯(1974-),男,四川成都人,工程师,工学学士,现于中铁建大桥工程局集团第五工程有限公司从事项目试验管理工作。

(责任编辑:卓政昌)