

纳米·增韧型粗纤维湿喷混凝土在锦屏二级水电站引水隧洞中的试验与应用

韩旭东, 葛军

(中国水利水电第七工程局有限公司, 四川成都 610081)

摘要:在锦屏二级水电站引水隧洞施工过程中,针对地下突涌水、高地应力岩爆以及断层破碎带等主要工程地质问题,利用无机纳米材料、增韧型聚丙烯合成粗纤维(有机仿)材料的特性,配制出纳米+增韧型聚丙烯合成粗纤维施工配合比,其具有粉尘小、早期强度高、回弹率小、一次喷射厚度高、施工经济、省时方便等优点。

关键词:无机纳米材料;增韧型粗纤维;湿喷混凝土;应用;锦屏二级水电站

中图分类号:TV7;TV554;TV522;TV42;TV41

文献标识码: B

文章编号:1001-2184(2014)06-0005-05

1 概述

锦屏二级水电站引水隧洞穿越的地层为三迭系浅海~滨海、海陆交替相地层,构成了引水隧洞的主要围岩,自西向东分别为 T2Z 杂谷脑组大理岩、T1 绿片岩、T3 砂板岩、T2b 白山组大理岩、T2y 盐塘组大理岩,其中碳酸盐岩石占 90%,其余为碎屑岩。在开挖施工过程中,主要存在地下突涌水、高地应力岩爆以及断层破碎带等主要工程地质问题。

(1)由于掌子面附近经常发生岩爆,采用普通混凝土喷射时,混凝土与围岩粘结强度不高,一次喷层厚度较薄,强度增长较慢;同时,由于施工进度需要,掌子面在前一循环喷射混凝土后 10~16 h 放炮,经常发生混凝土被震塌的现象,严重影响开挖进度和人员、设备的安全。

(2)对于开挖中遇到的富水地段,经常发生喷射后立即掉落的现象,混凝土与围岩无法粘结。

(3)对于断层和破碎带,开挖后需对围岩及时喷射混凝土进行封闭,才能在相对安全的条件下进行锚杆和网片等的施工。而普通的喷射混凝土很难达到设计要求,从而无形中增加了支护的时间,影响施工进度。

(4)受 TBM 设备限制,喷射钢纤维混凝土存在一定困难,容易堵管。

鉴于上述存在的问题,急需寻找一种材料以满足施工要求。超细粉磨无机纳米材料是一种经充分研磨、材料颗粒直径达到纳米级的混凝土外

加剂,它集减水、增强、促凝为一体,主要成份为二氧化硅,是一种无毒、无害、无味、无污染的无机材料。在喷混凝土中掺入该材料后,可以增加一次喷射厚度且回弹率大大降低、粉尘小,具有初期起强快、后期强度高、抗渗性能好、粘结强度高、耐久性强等优点。超细粉磨无机纳米材料作为喷射混凝土外加剂,能够适应诸多恶劣地质条件,如强岩爆、稳定性极差的洞段。对于强岩爆洞段,采用外掺无机纳米材料喷射混凝土,可以提高混凝土的一次喷射厚度,从而为系统锚杆支护提供施工时间和施工安全保障,且喷混凝土强度增长迅速,效果显著。对于一般富水区,采取对出水点进行封堵,然后使用掺入纳米湿喷混凝土全断面喷射 30~40 cm 厚的方式;对围岩破碎带及塌方抢险地段改普通喷射混凝土为纳米喷射混凝土。对于 TBM 洞段,采用纳米材料和增韧型聚丙烯合成粗纤维材料组合使用,可以替代钢筋网、钢纤维的防裂和增强功能,从而使施工更加经济、省时、方便,还能够抑制混凝土塑性收缩及干缩裂缝,提高混凝土的抗冻融能力、抗疲劳性、抗渗透性、抗磨、抗碎裂、抗冲击性能、抗弯增强和辅助增强功能;能够提高混凝土的支撑性能和黏结性能,产生有效的二级加强效果;其能够提供混凝土较高的残余强度,改善混凝土的耐久性,而且具有泵送容易,不会损坏机械设备,减少回弹、降低成本等特点。

2 材料特性

本工程选用成都宏达公司生产的宏达纳米材料和河南巩义生产的跨越 2000 型纳米材料,其材

收稿日期:2014-09-06

料性能见表1,检验项目见表2。

增韧型聚丙烯合成粗纤维(有机仿钢纤维):

表1 无机纳米材料性能表

项目	材质	性状	特点	作用
纳米材料	沸石磨至粒径 $<350 \times 10^{-9}$ m 的无机纳米材料,二氧化硅	粉状	(1)良好的抗渗性 (2)高减水率、粘结强度高 (3)无毒、无害、无味、无污染 (4)有较好的可喷性	增加一次喷射厚度且回弹率大大降低、粉尘小,具有初期起强快,后期强度高,抗渗性能好,粘结强度高、耐久性强等特点
使用范围	(1)CF30W8 纳米湿喷混凝土运用在锦屏二级水电站工程引水隧洞掌子面、上游调压室等新开挖洞段 (2)与增韧型粗纤维组合成 CF30W8 纳米有机仿湿喷混凝土运用在锦屏二级水电站工程引水隧洞 TBM 施工洞段、掌子面、上游调压室等新开挖洞段,主要针对地下突涌水、高地应力岩爆以及断层破碎带等施工面			

表2 纳米外加剂品质检验项目表

试验项目	颗粒直径 (中值粒径)	pH 值	总碱量 /kg	减水率 /%	泌水率
河南巩义样品	280×10^{-9} m	6.9	2.78	26.5	不泌水
成都宏达样品	340.7×10^{-9} m	6.8	2.7	31	不泌水
设计指标 JP II C - 5D7 - 4	$<350 \times 10^{-9}$ m	≤ 7.1	≤ 2.9	≥ 25	不泌水

增韧型聚丙烯合成粗纤维是一种新型增强、增韧材料,具有质轻、耐腐蚀、易于均匀分散、握裹力强,能提高混凝土的韧性、抗震防爆性能以及混凝土的早期抗裂性能,在喷混凝土中具有显著优势,

是一种具有广泛应用前景的混凝土增强、增韧材料,其性能见表3。

本工程选用深圳维克有限公司生产的有机仿钢纤维,其各项品质检验指标见表4。

表3 有机仿材料性能表

项目	材质	性状	特点	作用
增韧型粗纤维	聚丙烯	鱼骨形	(1)形态为鱼骨形 (2)可以替代钢纤维的防裂和增强功能 (3)断裂强度 ≥ 460 MPa, 初始模量 ≥ 6100 MPa, 断裂伸长率 $\leq 22\%$ (4)增加混凝土的支撑性和粘接性 (5)和易性好、泵送容易,不堵管、不会损坏设备、能够提高一次喷射厚度,减少回弹量	(1)有效增强与混凝土的握裹力 (2)施工经济、省时、方便 (3)抑制混凝土塑形收缩及干缩裂缝,能够提高混凝土的弯曲强度、抗冲击、抗裂性能、抗渗、抗冻性能,提高混凝土的耐久性 (4)提高混凝土的残余强度 (5)适用于喷射混凝土
使用范围	与纳米材料组合成 CF30W8 纳米有机仿湿喷混凝土运用在锦屏二级水电站工程引水隧洞 TBM 施工洞段、掌子面、上游调压室等新开挖洞段,主要针对地下突涌水、高地应力岩爆以及断层破碎带等施工面			

表4 深圳维克有机仿钢纤维品质检验项目表

项目	当量直径 /mm	断裂强度 /MPa	断裂伸长率 /%	密度	燃点 /°C	公称长度 /mm	初始模量 /kg·cm ⁻²	熔点 /°C	耐碱性能 强力保持率/%
试验结果	0.8	455	22	0.91	582	31	5.1	166	97.3
JP II C - 5D7 - 4	≥ 0.8	≥ 450	15~30	0.9±0.01	≥ 580	30~50	≥ 5	≥ 165	≥ 95

3 湿喷混凝土试验与应用

(1)湿喷混凝土配合比。

采用“乃托”普通硅酸盐 P. 042. 5R 水泥、水

电七局模砂沟砂石厂生产的砂石和以下外掺物,进行了湿喷混凝土拌和物性能、硬化性能检验,其配合比见表5。

表5 湿喷混凝土配合比参数表

强度等级	纳米 /%	水胶比 /%	砂率 /%	设计坍落度 /cm	水泥 /kg	用水量 /kg	砂 /kg	米石 /kg	有机仿 /kg	纳米 /kg
C30 纳米	10	0.48	60	14~18	419	201	1 006	670	/	41.9
CF30 纳米 有机仿	10	0.48	60	14~18	419	201	1 006	670	8	41.9

①C30 纳米:在 C30 纳米湿喷混凝土的基础上添加 8 kg/m^3 的深圳维克有机仿钢纤维,做纳米+有机仿钢纤维湿喷混凝土试验。

②C30 纳米: C30 纳米湿喷混凝土分别使用河南巩义生产的纳米外加剂和成都宏达生产的纳米外加剂,纳米外加剂掺量分别为水泥用量的

6%、7%、8%、10%，进行纳米湿喷混凝土对比试验。

(2)不同配比方案室内试验成果对比情况。

室内试验采用乃托普通硅酸盐 P.042.5R 水泥及河南巩义纳米外加剂和成都宏达纳米外加

剂,掺量分别为水泥用量的6%、7%、8%、10%，由深圳维克有限公司生产的维克有机仿钢纤维掺量为 8 kg/m^3 进行湿喷混凝土拌和物性能检验、硬化混凝土性能检验。混凝土各材料用量、试验成果见表6。

表6 不同配比方案湿喷混凝土室内试验成果对比表

配比方案	钢纤维类型/ 掺量 / $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	无机纳米材 料类型/掺量 / $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	水灰比	外加剂 /%	抗压强度	抗压强度	抗压强度	抗拉强度	抗折强度	抗渗等级 28 d
					1 d /MPa	7 d /MPa	28 d /MPa	28 d /MPa	28 d /MPa	
2-A (C30 纳米)	/	成都宏达 6%/25.1	0.48	/	12.2	31.6	39.5	3.1	8	/
2-B (C30 纳米)	/	成都宏达 7%/29.3	0.48	/	12.9	32.4	42.1	3.2	8.6	/
2-C (C30 纳米)	/	成都宏达 8%/33.5	0.48	/	14.2	34.6	44.9	3.3	9.9	/
2-D (C30 纳米)	/	成都宏达 10%/41.9	0.48	/	15.3	37.5	45.6	3.3	10.4	/
2-E (C30 纳米)	/	河南巩义 6%/25.1	0.48	/	12.6	28.7	37.8	3	7.6	/
2-F (C30 纳米)	/	河南巩义 7%/29.3	0.48	/	13.4	30.6	39.7	3.2	8.2	/
2-G (C30 纳米)	/	河南巩义 8%/33.5	0.48	/	14.1	33.5	42.4	3.3	10.3	>W8
2-H (C30 纳米)	/	河南巩义 10%/41.9	0.48	/	15.6	33.9	48	3.5	9.3	>W8
3-B CF30 纳米有机仿	深圳维克/8	河南巩义 10%/41.9	0.48	/	14.7	43.3	54.5	3.4	12.3	>W8
3-D CF30 纳米有机仿	深圳维克/8	成都宏达 10%/41.9	0.48	/	14	39.4	48.7	3.4	10.6	>W8

试验结果表明:不同厂家生产的纳米外加剂品种对混凝土强度及其它性能影响较小,均可进行互换;通过掺量为6%、7%、8%、10%的纳米外加剂进行的混凝土强度试验可知,混凝土强度随着纳米外加剂掺量的增加而增加。

(3)现场湿喷混凝土试验。

现场试验选用“乃托”普通硅酸盐 P.0 42.5R 水泥及河南巩义生产的纳米外加剂和成都宏达生产的纳米外加剂,掺量分别为10%。对于采用深圳维克有限公司生产的维克仿钢纤维掺量为 8 kg/m^3 进行了现场湿喷混凝土拌和物性能检验。

试验位置的选择和施工工艺。

①试验位置选择在1#、2#、3#、4#洞进行,施工工艺采用湿喷技术,利用C4、C5标段正在使用的大型湿喷机进行试验;试验时喷头宜与受喷面垂直,喷射距离为1.2~1.8 m,喷射角度应尽量

与喷射面垂直,喷射时应自下而上,喷嘴应做小圆周运动,喷混凝土风压要比普通喷混凝土高 $0.2 \sim 0.5 \text{ kg/cm}^2$,一般为 $1.5 \sim 2 \text{ kg/cm}^2$;喷射拱部时应稍大;喷射作业应分段分片进行,喷射顺序应自下而上。为保证喷射层与岩壁的粘结强度,在实施喷混凝土前,应保持岩壁和喷混凝土表面湿润,以保证新老喷混凝土结合良好。在施喷(包括填平补齐)前,应用高压风($4 \sim 5 \text{ kg/cm}^2$)加水认真冲洗干净并排除积水。

②现场喷射试验,在14 d龄期时用喷大板切割法制备试件,在标准养护室中养护至28 d龄期后进行试验。其中喷射混凝土与围岩黏结强度采用劈裂法;韧度指标试验采用 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$ 的梁式试件。有机仿钢纤维喷射混凝土弯曲韧度指数试验委托大连理工大学进行。

室内喷射混凝土性能试验成果列于表7,现

场喷射混凝土性能试验成果列于表8,现场喷射混凝土测试成果见表9。

表7 喷射混凝土现场大板试验及室内成型试验成果表

编号	混凝土设计强度等级(配比方案)	水胶比	用水量 /kg·m ⁻³	砂率 /%	纳米掺量 /%	硅粉掺量 /%	外加剂 /%	坍落度 /cm	实测值 /cm	抗压强度 /MPa		抗拉强度 /MPa	抗折强度 /MPa	抗渗等级	弹性模量 ×10 ⁴ MPa		回弹量 /%
										7 d	28 d	28 d	28 d	≥ W8	28 d	28 d	
B001	CF30 纳米有机仿(现场)	0.48	201	60	10	/	/	14~18	17.5	34.3	41.7	3.4	12.1	> W8	3.32	8.9	
Z643	CF30 纳米有机仿(室内)	0.48	201	60	10	/	/	14~18	17.5	36	41.8	/	9.1	/	/	/	
Z647	CF30 纳米有机仿(室内)	0.48	201	60	10	/	/	14~18	21.5	43.2	47.9	/	8.9	/	/	/	
B006	C30 纳米(现场)	0.48	201	60	10	/	/	14~18	20	/	31	2.7	9.4	> W8	2.9	8.9	
Z801	C30 纳米(室内)	0.48	201	60	10	/	/	14~18	20	33.5	41.2	3.4	/	/	/	/	
B008	C25 喷射(现场)	0.48	218	60	/	/	JG-2H	14~18	19	/	32	2.3	7.3	> W8	2.34	/	
Z837	C25 喷射(室内)	0.48	218	60	/	/	JG-2H	14~18	19	33.1	38.8	2.7	/	/	/	/	

表8 现场试验喷射混凝土性能试验成果汇总表(大板试验)

配比序号	强度等级	纤维掺量 /kg·m ⁻³	坍落度 /cm	抗压强度	抗拉强度	抗折强度	抗渗等级	弹性模量 ×10 ⁴ MPa	喷射混凝土与围岩黏结强度(劈裂法) /MPa	弯曲初度指数	弯曲初度指数	弯曲初度指数	韧性系数 R _{30/10}	
				28 d	28 d	28 d	28 d	28 d		I ₅	I ₁₀	I ₃₀		
本工程喷射混凝土试验要求										≥1.2 MPa (II类围岩)	≥3	针对有机仿钢纤维喷射混凝土	仅针对钢纤维喷射混凝土	
①	C30 纳米	/	22.1	46.1	3.16	/	/	/	1.92	/	/	/	/	
②	CF30 纳米有机仿(深圳维克)	8	21	43.4	3.25	10	≥W8	3.41	1.6	3.84	6.04	13.11	35.35	

表9 喷射混凝土现场测试成果表

混凝土类型(配比方案)	试验部位	喷层厚度			最高一层喷层厚度试验 /cm	回弹量 /%
		孔径 /mm	钻孔数量 /个	平均喷层厚度 /cm		
CF30 纳米 + 有机仿钢纤维	1#引水洞	100	3	17	43	/
	4#引水洞	100	4	8.1	46	8.9
C30 纳米	4#引水洞	100	5	9.5	/	8.9

上述试验结果表明:单掺纳米湿喷混凝土、纳米 + 有机仿钢纤维湿喷混凝土的各项力学性能指标均满足设计要求,不同厂家外加剂品种、不同厂家纳米外加剂品种、不同厂家有机仿钢纤维品种对混凝土强度及其它性能影响较小,均可进行互换。单掺纳米湿喷混凝土、纳米 + 有机仿钢纤维湿喷混凝土配合比均满足锦屏二级水电站引水隧洞施工要求。

4 结语

(1) 纳米 + 有机仿钢纤维湿喷混凝土与围岩

黏结强度(采用劈裂法)为 1.6 MPa;弯曲初度指数 I₅ 为 3.84,满足 ≥3 的设计要求;28 d 抗压强度为 43.4 MPa,抗拉强度为 3.25 MPa,抗折强度为 10 MPa,抗渗等级 ≥ W8,弹性模量为 3.41 × 10⁴ MPa,对混凝土的韧性改善较大,可提高混凝土的抗弯韧性。

(2) 纳米 + 有机仿钢纤维湿喷混凝土施工方便,与混凝土有良好的和易性,搅拌无结团;泵送容易,不易磨损管道,能够减少回弹、降低成本。

(3) 增加一次性喷射厚度且回弹率小、粉尘小,具有初期起强快,后期强度高,抗渗性能好,粘

结强度高、耐久性强等优点。

(4)能够抑制混凝土塑性收缩及干缩裂缝,提高混凝土抗冻融能力、抗疲劳性、抗渗透性、抗磨、抗碎裂、抗冲击性能,具有抗弯增强和辅助增强功能。

该配比通过在锦屏二级水电站引水隧洞中的应用,能够适应诸多恶劣地质条件,如强岩爆、稳定性极差的洞段。对于强岩爆洞段,采用外掺无机纳米材料喷射混凝土,可以提高混凝土的一次喷射厚度,为系统锚杆支护提供施工时间和施工安全保障,且喷混凝土强度增长迅速,效果显著。截止到2012年10月25日,C30纳米湿喷混凝土在1~4#引水洞和施工排水洞中共使用102 778 m³,CF30纳米仿钢湿喷混凝土在1~4#引水洞、1~4#调压室顶拱和施工排水洞中共使用58 741

m³,工程质量满足设计要求,得到业主、设计及多家施工单位的好评。纳米材料、增韧型聚丙烯合成粗纤维等喷射混凝土在锦屏二级水电工程中的首次运用,保证了锦屏二级水电站引水隧洞的施工质量,为工程进度赢得了时间。

随着湿喷混凝土技术的快速发展,特种湿喷混凝土作为大洞室锚喷支护施工中的重要组成部分,在快速支护和应对复杂地质条件等方面发挥出巨大的作用。

作者简介:

韩旭东(1967-),男,山东潍坊人,锦屏二级水电站东端项目部试验室主任,工程师,从事水电工程施工技术与管理工作;

葛军(1960-),男,贵州黎平人,锦屏二级水电站东端项目部副经理,工程师,从事水电工程施工技术与管理工作。

(责任编辑:李燕辉)

(上接第4页)

(2)通过此次检修发现:导流洞水流冲击对混凝土的破坏主要集中在边墙及以下部位。总体来说导流洞顺水流向左侧冲刷较右侧严重,冲刷严重部位主要集中在进口段、两侧贴角与底板交界处、两浇筑段结构缝等处。这些现象的发现,可为其他导流洞对冲蚀破坏的预防和治理提供一定的数据和依据。

(3)当导流洞缺陷修补施工工期较紧时,对于深度3 cm以下的冲槽仅使用磨光机对其缺陷

部位按照水流方向进行局部打磨是一种非常快速、有效的修补手段。

(4)此次施工实践证明:使用M60砂浆及C50硅粉混凝土作为修补材料,不仅在施工过程中比使用环氧砂浆等材料更为经济且更加便捷。

作者简介:

金大鑫(1987-),男,四川温江人,助理工程师,学士,从事水电工程施工技术与管理工作。

(责任编辑:李燕辉)

由中水五局公司承建的锦屏二级水电站7号机一次启动成功

9月26日14时26分,在中水五局公司成立60年之际,由中水五局制安分局承担的单机60万千瓦的锦屏二级水电站7号机组一次启动成功,比计划提前两天完成节点目标,实现了公司单机60万千瓦机组的安装梦,跻身于水电行业“70万千瓦”机组安装俱乐部。自2011年4月锦屏二级水电站7号机组安装进场以来,经过制安分局广大建设者历时三年多时间的努力拼搏,终于迎来了公司首台60万千瓦水电机组的启动。在整洁的开机现场,各项准备工作有序进行,人员、措施落实到位,业主、监理、施工方三方联合检查并经启动领导小组同意,14时26分,7号机组缓缓启动,按照有水调试计划和大纲,分阶段平稳升至额定转速,无异常情况发生,一次启动成功。制安分局试验室、锦屏电厂、中鼎公司人员共同参与了机组运行数据的监测,摆度、温度等实测数据令各方十分满意。机组转动平稳,站在盖板上几乎感觉不到震动,证明安装质量优异,安全可靠。60万千瓦机组的各项技术指标完全达到业主方编制的“二滩规范”要求,参数显示优于前6台机组。锦屏二级电站7号机组的完美启动,使中水五局公司机电安装水平得到了进一步的提升,安装技术实现了质的飞跃,为今后开拓大业主、大流域、大机组市场开拓奠定了基础,赢得了信誉,增强了信心。雅砻江流域水电开发有限公司副总经理张肇刚、凉山彝族自治州副州长等业主和地方领导分别亲临现场,查看了安装现场,对水电五局为锦屏电站建设做出的突出贡献给予了充分的肯定。锦屏建设管理局局长王继敏、中水五局公司副总经理张郁涛、制安分局局长李则泉、二滩国际总监李兴易等见证了这一难忘的时刻。