

文章编号:0559-9350(2013)04-0500-05

胶凝砂砾石坝筑坝材料耐久性能研究及新型防护材料的研发

冯 伟, 贾金生, 马锋玲

(中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038)

摘要: 针对胶凝砂砾石坝体材料和新型保护层材料抗渗和抗冻性能展开了试验研究, 其中抗冻测试中引入气冻和冰冻两种测试手段以表征胶凝砂砾石抵抗冻融和温度循环的能力。结果表明, 未掺外加剂的胶凝砂砾石 180d 龄期抗渗可达到 W8, 90d 龄期抗冰冻不足 25 次冻融循环, 气冻 350 次温度循环后相对动弹性模量仍约 65%, 抗气冻可到 600 次以上温度循环。掺外加剂的胶凝砂砾石相应龄期的抗渗为 W12, 抗冰冻达 75 次冻融循环, 气冻 350 次温度循环后相对动弹性模量仍有 80% 以上。因此建议胶凝砂砾石中采用外加剂, 并以长龄期 180d 为设计龄期。新型保护层材料的研发试验表明, 变态胶凝砂砾石、富浆胶凝砂砾石均具有良好的防渗(抗渗等级 W10 以上)和抗冻能力(F300 次冻融循环), 可作为胶凝砂砾石坝上、下游防渗抗冻保护层材料。

关键词: 胶凝砂砾石; 坝体材料; 保护层材料; 耐久性

中图分类号: TV641

文献标识码: A

1 研究背景

胶凝砂砾石(Cemented Sand & Gravel, CSG)筑坝技术是国际上近年发展起来的新型筑坝技术, 其特点是采用胶凝材料和砂砾石材料(包括砂、石、砾石等)拌和筑坝, 使用高效率的土石方运输机械和压实机械施工^[1-3]。胶凝砂砾石坝强调“宜材适构”, 注重就地取材、减少弃料, 要求结合当地材料情况, 研究确定合适的坝工结构, 选择一种或几种筑坝技术联合筑坝。该坝型具有经济、快速、安全和环保等优点, 推广应用前景广阔。近年日本、土耳其、希腊、法国和菲律宾等国家已将胶凝砂砾石筑坝技术应用到永久工程^[4-7]。胶凝砂砾石筑坝技术扩大了坝型选择范围, 放宽了筑坝条件, 丰富了以土石坝、混凝土坝和砌石坝等为主的筑坝技术体系。胶凝砂砾石筑坝技术的研究及推广应用, 对于节能减排、积极开发水电可再生能源和我国面广量大的中小型水利水电工程建设以及众多病险工程的除险加固具有重要的意义。近十年来, 我国已建街面水电站下游围堰、洪口水电站上游围堰、功果桥水电站上游围堰等多座胶凝砂砾石围堰工程^[8-10], 目前第一座胶凝砂砾石坝——山西守口堡水库大坝即将开工建设。作为永久工程, 涉及到大坝的长期安全, 探究有关坝体和保护层耐久性的问题至关重要。

本文针对坝体胶凝砂砾石的抗渗和抗冻性能, 以及新型保护层材料即变态胶凝砂砾石和富浆胶凝砂砾石的配制及其耐久性能开展试验研究。鉴于胶凝砂砾石抗冰冻弱的特点, 提出一种气冻方法, 即在保护层起到防渗漏作用下, 探究坝体材料抵抗温度循环的能力。

2 坝体材料抗渗和抗冻性能试验研究

胶凝砂砾石耐久性主要研究其抗渗和抗冻等性能, 同时开展气冻性能对比研究, 即相同配比的

收稿日期: 2012-12-10

基金项目: 国家重点基础研究计划(973计划)(2013CB035900)

作者简介: 冯伟(1977-), 男, 内蒙古鄂尔多斯人, 高级工程师, 博士生, 主要从事水工材料研究。E-mail: fengwei@iwhr.com

胶凝砂砾石在饱水后，一部分按照《水工混凝土试验规程》(SL352-2006)进行常规快速冻融试验(置于冻融试验机，模套内加满水)，一部分进行气冻试验(置于冻融试验机，模套内不加水)，降温控制最终温度在 $-17^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$ 范围内，升温控制最终温度在 $8^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$ 。

2.1 原材料 试验采用北京周边河床砂砾石，最大骨料粒径为150mm，砂中含泥量为6.7%。水泥采用冀东42.5普硅水泥，山西大同热电二厂Ⅱ级粉煤灰，北京中水科海利公司生产的高效减水剂和引气剂。

2.2 抗渗性能 选用北京周边河床砂砾石，胶凝砂砾石配合比见表1。抗渗试验采用逐级加压法，试验结果见表2。

表1 CSG耐久性试验配合比

编号	材料用量/(kg/m^3)					外加剂/%	
	水泥	粉煤灰	水	砂	石子	减水剂	引气剂
未掺外加剂	40	40	72	583	1 816	0	0
掺外加剂	40	40	56	581	1 808	1	0.08

表2 CSG材料的抗渗性能

编号	含气量/%	抗压强度/MPa			抗渗等级		
		28d	90d	180d	28d	90d	180d
未掺外加剂	0.9	6.7	11.2	14.1	W4	W6	W8
掺外加剂	3.5	7.9	13.8	16.3	W7	W10	W12

由表2可见，相同胶凝材料用量，采用高效减水剂及引气剂降低了水胶比，不仅强度有所增加，抗渗性能也有了明显提高。不掺外加剂的胶凝砂砾石28d、90d、180d龄期抗渗等级分别为W4、W6、W8；掺外加剂后的胶凝砂砾石28d、90d、180d龄期抗渗等级分别为W7、W10、W12，掺外加剂后降低了水胶比可使CSG材料抗渗性能提高。室内试验表明，材料均匀、振捣密实的CSG材料具有较高的抗渗性能。但实际施工中，由于CSG材料的特性和施工特点，往往达不到室内试验结果。

2.3 抗冻(冰冻、气冻)性能 CSG材料抗冻试验采用快冻法，试验结果见表3。

表3 CSG材料的抗冻性能

编号	28d龄期			90d龄期			
	冻融次数	失重率/%	相对动弹性模量/%	冻融次数	失重率/%	相对动弹性模量/%	
未掺外加剂	冻融次数	25	50	冻融次数	25	50	
	失重率/%	2.1	3.5	失重率/%	1.2	2.8	
	相对动弹性模量/%	35.1	25.3	相对动弹性模量/%	45.8	32.3	
掺外加剂	冻融次数	25	50	冻融次数	25	50	75
	失重率/%	1.5	2.3	失重率/%	1.1	1.8	2.2
	相对动弹性模量/%	68.8	57.8	相对动弹性模量/%	76.4	70.1	63.7

由表3可见，未掺外加剂的CSG材料，28d和90d龄期均不具备抗冰冻能力，快速法50次冻融循环后，试件基本呈冻裂破坏。掺外加剂后，CSG材料的抗冻性有所改善，90d龄期的冻融循环可达到75次。

由于胶凝砂砾石抵抗冰冻能力差，为探索其它形式表征胶凝砂砾石耐久性能，提出气冻试验方法，胶凝砂砾石抵抗气冻能力的高低可以反映其抵抗温度变化的能力。气冻试验测试了未掺外加剂的CSG(28d龄期、90d龄期)试件和掺外加剂的CSG(90d龄期)试件，为了对比胶凝砂砾石与常规碾压混凝土抗气冻性能的差别，增加了一组碾压混凝土试件(水泥 $69\text{kg}/\text{m}^3$ ，粉煤灰 $103\text{kg}/\text{m}^3$ ，砂率32%，含气量3.1%，90d龄期)。经过试件饱水后进行气冻试验发现，未掺外加剂的CSG(28d龄期)试件同样难以抵抗气冻循环，其经历15次气冻循环，相对动弹性模量下降到52%，40次气冻循环后，相对动弹性模量下降到37%，55次后，下降到31%。

90d龄期CSG试件的气冻试验结果见图1和图2。从图中可以发现，掺外加剂的CSG试件及碾压混凝土试件经50次气冻循环后，相对动弹性模量约为90%；未掺外加剂的CSG试件经50次气冻循环后，相对动弹性模量约为70%，其后随着气冻循环次数的增加，相对动弹性模量均降低缓慢。350次气冻循环后，掺外加剂的CSG试件相对动弹性模量为85%左右，未掺外加剂的CSG试件相对动弹性模量为65%左右，碾压混凝土相对动弹性模量为80%左右。继续增加气冻循环，未掺外加剂的CSG试件气冻循环到635次，碾压混凝土气冻循环到865次，相对动弹性模量变化不大。3种试件最终质量损失在2%~3%。

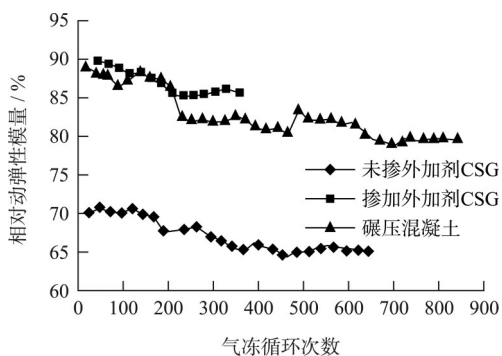


图1 抗气冻循环次数与相对动弹性模量关系曲线

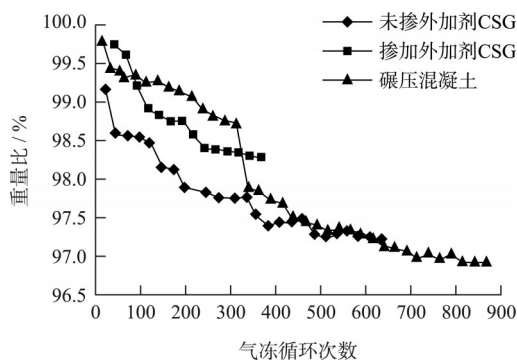


图2 抗气冻循环次数与重量比关系曲线

将经历气冻循环后的试件进行抗压强度测试，结果发现，未掺外加剂的CSG试件气冻循环635次后(1个气冻循环历时约3h，635次气冻循环历时约80d)的抗压强度为11.1MPa，比对应龄期标准养护试件的强度下降13%；掺外加剂的CSG试件气冻循环350次后的抗压强度为13.6MPa，比对应龄期标准养护试件的强度下降9%；碾压混凝土试件气冻循环865次后的抗压强度为15.3MPa，比对应龄期标准养护试件的强度下降7%。经历气冻循环后，胶凝砂砾石的强度有所下降，但下降幅度不超过20%，仍具有满足工程设计要求的力学强度。

分析以上试验，可以认为，试件饱水后经历气冻循环试验，由于最初水分的存在，在早期的气冻循环过程中，试件在一定程度上也经受了冰胀的破坏。随着循环次数的增加，水分散失，后期转变为经受单一的温度变化后，长龄期的CSG试件表现出良好的抗气冻能力，因此可考虑用于坝体水位变化区的上部。

3 新型坝体保护层材料研发及抗渗和抗冻性能试验研究

3.1 变态胶凝砂砾石试验 借鉴碾压混凝土坝采用变态碾压混凝土防渗经验，本文采用变态胶凝砂砾石防渗设计思路，即在胶凝砂砾石铺筑过程中，在其上游面一定范围内的胶凝砂砾石中添加一定比例的灰浆，然后进行振捣直至泛浆。变态胶凝砂砾石的厚度以及添加灰浆的配合比需要经过试验确定。这种方式的好处是避免了采用常态混凝土防渗时与胶凝砂砾石同时施工的干扰。

浆液必须具有良好的流变性、体积稳定性和抗离析性，且凝固后具有较高的强度和变形性能。目前工程使用的加浆材料由水、水泥、粉煤灰和外加剂组成，经机械搅拌而成浆液。浆液流变性采用Marsh流动度表示，值越小表示流动性越好，但涉及浆液稳定性和抗离析性能会变差。

试验采用山西守口堡水库大坝附近河床砂砾石料，最大骨料粒径为150mm，砂中含泥量为15.9%，其它原材料同前。经优选的浆液配合比见表4。

本文中加浆量为10%，加浆后胶凝砂砾石的抗渗和抗冻耐久性见表5。

变态胶凝砂砾石180d龄期抗压强度24.9MPa，轴拉强度2.28MPa，极限拉伸 79×10^{-6} ，弹性模量

表4 浆液优化配合比

外加剂掺量/%		浆液材料用量/(kg/m ³)			Marsh
减水剂	引气剂	水	普硅42.5水泥	Ⅱ级粉煤灰	流动度/s
0.5	0.05	480	600	755	45

表5 加浆CSG材料抗渗和抗冻性能试验结果(90d龄期)

抗渗等级	相对动弹性模量%/质量损失率%					
	50次	100次	150次	200次	250次	300次
W13	87.6	83.3	80.0	73.5	67.1	63.5
	0.02	0.08	0.15	0.68	1.22	1.53

32.2GPa, 具有较好的力学性能。其90d抗渗等级为W13, 抗冻等级为F300, 具有良好的抗渗、抗冻耐久性能, 可满足胶凝砂砾石坝上、下游防渗保护的要求。

3.2 富浆胶凝砂砾石试验研究 富浆胶凝砂砾石是指增加胶凝材料用量(150kg/m³以上)的胶凝砂砾石。其施工简易, 可不额外增加拌和系统, 与坝体施工同步进行。试验配合比见表6, 抗冻和抗渗等性能试验结果见表7。

表6 三级配富浆胶凝砂砾石配合比

编号	砂率/%	减水剂/%	引气剂/%	材料用量/(kg/m ³)						
				水	水泥	粉煤灰	砂	小石	中石	大石
S100-30	30	0.8	0.1	90	100	90	649	598	543	356
S100-45	45	0.8	0.1	118	100	90	921	445	404	265

表7 三级配富浆胶凝砂砾石90d龄期性能试验结果

编号	湿筛容重/(kg/m ³)	VC值/s	含气量/%	抗压强度/MPa	抗渗等级	相对动弹性模量%/质量损失率%			
						50次	100次	200次	300次
S100-30	2389	8	6.1	20.5	W12	94.2	91.9	90.4	88.2
						0.03	0.05	0.09	1.25
S100-45	2378	5	5.8	15.4	W11	91.2	90.1	88.3	85.2
						0.05	0.08	1.59	2.15

由表7可见, 增加胶凝材料用量, 并提高引气剂使含气量达到6%左右, 两个配合比的三级配富浆胶凝砂砾石90d龄期的抗渗等级都达到W10以上, 抗冻达到F300, 可满足上、下游面保护层防渗抗冻的要求。

3.3 保护层材料成本方案比较 胶凝砂砾石坝上、下游面可采用多种防渗抗冻保护模式以满足工程要求。对其成本(仅为材料出厂成本, 未计算运输、拌和等施工费用)和施工工艺等进行粗略比较, 见表8。从表8可以看出, 常态混凝土与变态碾压混凝土成本最高, 而富浆胶凝砂砾石和变态胶凝砂砾石由于可以利用现场砂砾料, 成本大大降低, 单方材料成本最低, 且施工与坝体胶凝砂砾石的施工配合的更好, 干扰较少, 因此更具有推广优势。具体方案的选择, 也需根据工程特点与施工简易性等因数综合考虑。

表8 各方案成本和工艺比较

保护层材料	胶凝材料/(kg/m ³)		单方成本/元	施工工艺比较	备注
	水泥	粉煤灰			
常态混凝土	130	70	299	常态振捣, 需要级配骨料, 与CSG碾压施工有干扰	砂石骨料平均每吨100元
变态碾压混凝土	96	110	288	集中制浆、变态振捣, 需要级配骨料	砂石骨料平均每吨100元
变态胶凝砂砾石	96	110	134	集中制浆、加浆振捣, 利用砂砾石料	砂砾料每吨30元
富浆胶凝砂砾石	100	90	133	摊铺碾压, 利用砂砾石料	砂砾料每吨30元
堆石混凝土	208	274	228	立模堆石, 自密实混凝土需要级配骨料	自密实混凝土填充体积45%

注: 参考价格: 中热42.5水泥450元/t; 粉煤灰120元/t; 高效减水剂8000元/t; 引气剂13000元/t; 自密实混凝土所需小粒径骨料和砂平均150元/t。

4 结论

(1)未掺外加剂的胶凝砂砾石抗渗等级可达到W8,抗冰冻性能差,不足F25,抗气冻可到600次以上温度循环。掺外加剂后胶凝砂砾石抗渗等级为W12,抗冰冻达F75,气冻350次后相对动弹性模量仍有80%以上,继续气冻循环其变化很小。长龄期的胶凝砂砾石具有较好的抵抗温度变化的能力。

(2)为提高胶凝砂砾石坝体材料的耐久性,保证大坝安全,建议胶凝砂砾石掺外加剂,并以长龄期180d为设计龄期。

(3)针对胶凝砂砾石坝特点配制的变态胶凝砂砾石、富浆胶凝砂砾石等新型防渗材料均满足坝体保护层材料防渗和抗冻的设计要求,且成本相对最低,施工便易,推荐作为保护层材料的优选方案。

参 考 文 献:

- [1] 贾金生,马锋玲,李新宇,等.胶凝砂砾石坝材料特性研究及工程应用[J].水利学报,2006,37(5):578-582.
- [2] 熊堃,何蕴龙,吴迪.Hardfill坝结构破坏模型试验研究[J].水利学报,2012,43(10):1214-1222.
- [3] Taro Uchimura, Yuko Kuramochi, Bach Thuan Thai. Material properties of intermediate materials between concrete and gravelly soil[C]//Soil Stress-strain Behavior: Measurement, Modeling and Analysis Geotechnical Symposium. Roma, 2006: 473-478.
- [4] Serhat Batmaz. Cindere dam-107m high Roller Compacted Hardfill Dam in Turkey[C]//Proceedings of The Fourth International Symposium on Roller Compacted Concrete Dams. Spain, 2003: 121-126.
- [5] Hanada H, Ooyabu K, Tamezawa T, et al. CSG method using muck excavated from the dam foundation[C]//Proceedings of The Fourth International Symposium on Roller Compacted Concrete Dams. Spain, 2003: 447-456.
- [6] Hirose T, Fukisawa T, Yoshida H, et al. Design concept of trapezoid-shaped CSG dam[C]//Proceedings of The Fourth International Symposium on Roller Compacted Concrete Dams. Spain, 2003: 457-464.
- [7] Hirose T, Fukisawa T, Yoshida H, et al. Concept of CSG and its material properties[C]//Proceedings of The Fourth International Symposium on Roller Compacted Concrete Dams. Spain, 2003: 465-473.
- [8] 田育功,唐幼平.胶凝砂砾石筑坝技术在功果桥上游围堰中的研究与应用[J].水利规划与设计,2011(1):51-57.
- [9] 彭成山,张学菊,孙明权.超贫胶结材料特性研究[J].华北水利水电学院学报,2007,28(2):26-29.
- [10] 魏建忠,吴祖廷,等.新型贫胶硬填料筑坝技术研究应用[C]//中国碾压混凝土筑坝技术.北京:中国水利水电出版社,2010:164-171.

Study on durability of dam materials and new-type protective materials for cemented sand and gravel dam

FENG Wei, JIA Jin-sheng, MA Feng-ling

(China Institute of Water Resources and Hydropower Research,

State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, Beijing 100038, China)

Abstract: A series of experiments were made to test the frost-resistance (including frost-resistance in air and frost-resistance in water) and impermeability of CSG and a new type of protective materials. Results show that the impermeability level of CSG without additive cured for 180d can reach W8, and the CSG cure for 90d was destroyed in less than 25 freezing-thawing cycles in water while was not destroyed in over 600 cycles in air. For the CSG with additive, the impermeability level at 180d can reach W12, and it was destroyed in over than 75 freezing-thawing cycles in water while was not destroyed in over 350 cycles in air. Therefore additive is recommended in CSG mixing design. Tests on a new type of protective materials show that CSG adding grout and CSG with more cementitious materials both have good impermeability levels (over W10) and frost-resistance (F300) and can be used as protective layers in CSG dams.

Key words: cemented sand and gravel; dam materials; protective materials; durability

(责任编辑:王冰伟)