

红层砂岩胶结颗粒料坝特性的试验研究

杨小奇, 彭明亮, 胡人炭

(四川省水利水电勘测设计研究院, 四川 成都 610072)

摘要:近些年来,中国水利水电科学研究院提出了胶结颗粒料坝技术,在全国开展推广应用。因环保等因素,胶结颗粒料坝砂砾石材料缺乏,阻碍胶结颗粒料坝技术在我省使用。为探索红层砂岩加工骨料掺入砂砾石混合材料修建胶结颗粒料坝技术,在金鸡沟水库胶结颗粒料坝开展了红层砂岩胶结颗粒料坝特性的试验研究。结果表明,胶结体随着砂岩骨料掺配比例的增加,粗粒径骨料集中现象越明显,骨料嵌合程度越低,胶结程度越差,密实程度也就相对较低;砂岩与砂卵石混合骨料混合分布越均匀,胶凝材料包裹率越高,胶结坝体密实度越高。

关键词:红层砂岩;胶结颗粒;砂砾石;掺配比

中图分类号:P588.21+2.3; O212.6; TU528.044

文献标识码: B

文章编号:1001-2184(2020)02-0090-05

Experimental Study on the Characteristics of Cemented Granular Material Dam of Red Bed Sandstone

YANG Xiaqi, PENG Mingliang, HU Rentan

(Sichuan Water Resources and Hydroelectric Investigation & Design Institute, Chengdu, Sichuan, 610072)

Abstract: In recent years, China Institute of Water Resources and Hydropower Research has put forward the technology of cemented granular material dam, which has been widely applied in China. Due to environmental protection and other factors, the lack of sands gravel materials for cemented granular material dam hinders the application of cemented granular material dam technology in our province. In order to explore the construction technology of cemented granular material dam with red bed sandstone processing aggregate mixed with sand gravel mixture, the experimental study on the characteristics of cemented granular material dam of red bed sandstone was carried out in Jinjigou Reservoir. The result shows that with the increase of the mixing proportion of sandstone aggregate, the concentration of coarse-grained aggregate is more obvious, the lower degree of aggregate mixing is, the worse degree of cementation is, and the lower compactness is; the more uniform the mixing distribution of sandstone and gravel aggregate is, the higher the wrapping ratio of cementing material is, and the higher the compactness of cemented dam is.

Key words: red bed sandstone; cemented granular; sand gravel; mixing ratio

0 引言

胶凝砂砾石坝是一种兼具土石坝与混凝土坝优点的新坝型^[1],采用不受传统级配限制要求的天然砂砾石或人工砂石,用较少的水泥、粉煤灰等胶凝材料,通过拌和、摊铺、振动等施工工艺进行筑坝,形成具有一定强度特性、抗冲刷和抵御洪水漫顶能力的坝体。不受传统级配限制的骨料优势,拓宽了骨料选取的适宜范围,可直接选取坝址河床开挖的砂卵石料、枢纽建筑物开挖的砂砾石料、石渣料等,不仅节约了材料的造价成本,而且减轻了水利工程建设对周围环境的破坏程度,符

合“经济、低碳、绿色、环保”等建设特点^[2-4]。胶凝砂砾石坝概念自被提出以后,已成功应用于多个水利水电建设工程中^[5],比较典型的工程如:山西守口堡水库大坝,坝高 61.4 m^[6],功果桥水电站上游围堰,高 56 m^[7]。

四川省是水利建设大省,90%以上水库的坝型为土石坝,引入新坝型替代传统坝型具有深远的价值意义,特别是推出具有四川省当地建筑材料的特色的胶结新坝型,能推动四川省水利水电行业的发展。四川省位于中国西南地区,是红层分布极为广泛的省份之一,其岩性以泥岩、砂岩、砂质泥岩、泥质砂岩等为主,大多具有软岩特征。

收稿日期:2020-02-12

国内外已建成的砂砾石坝,多采用河床砂卵石、坝基开挖料或简易筛分的人工骨料作为砂砾石的主要构成集料,然而,以砂岩为主要构成料的胶结坝工程尚未见到应用案例。因此,本文依托《四川省红层地区金鸡沟水库胶凝砂砾石坝现场变形剪切试验》项目,结合四川地区软岩分布广的特点,开展基于砂岩胶结坝特性的试验研究,为在四川红层砂岩地区推广应用胶结新坝型提供借鉴和参考。

1 砂岩胶结坝的原材料

砂岩胶结坝的原材料主要包括水泥、掺合料、外加剂、粗细骨料、砂岩等。水泥品种为达州海螺水泥有限公司生产的 P.O42.5 水泥,掺合料品种

为渠县长远粉煤灰综合利用有限公司生产的Ⅱ级粉煤灰,外加剂品种为北京新慧水利建筑工程有限公司生产的胶结砂砾石专用外加剂,粗细骨料为蓬安马回料场所生产,砂岩选自库区砂岩料场。

2 胶结砂岩配合比及材料性能

为研究砂岩掺配比例对胶结体的影响特性,开展了砂岩掺量分别为 50%,60%,70%的胶结砂砾石材料性能试验。测试性能指标包括抗压强度、劈拉强度、抗剪强度、弹性模量、极限拉伸值、抗渗性和抗冻性等。

2.1 胶结砂岩配合比

根据已选定的混合骨料配制砂岩胶结砂砾石料,砂岩胶结砂砾石配合比见表 1。

表 1 砂岩胶结砂砾石配合比

砂岩骨料比例 /%	水胶比	水 /kg	水泥 /kg	外加剂 /kg	粉煤灰 /kg	砂岩 /kg	5~40 mm 石 卵石 /kg	卵石破碎砂 /kg
50	0.71	85	60	60	1.2	1 057	558	555
60	0.69	90	65	65	1.35	1 255	441	439
70	0.64	90	70	70	1.4	1 457	264	393

备注:1.骨料最大粒径为 150 mm,全部为一次破碎骨料;2.表中材料用量单位为 kg/m³,骨料为饱和面干状态

2.2 材料性能

按不同掺配比例砂岩骨料的配合比,制备了砂岩与卵石混合骨料的胶结湿筛试件,试件尺寸

见表 2,开展了相关材料性能试验,分析不同掺配比例砂岩骨料的胶结体材料性能,结果见表 3。

表 2 胶结砂砾石配合比表(砂岩掺量:50%、60%、70%)

序号	胶结砂砾石性能指标	试件尺寸 /mm	试验组数 /组		
			28 d 龄期	90 d 龄期	180 d 设计龄期
1	抗压强度(fcc)	150×150×150	1	1	1
2	劈拉强度(fts)	150×150×*150	1	1	1
3	抗剪强度(τ)	150×150×150	1	1	1
4	弹性模量(Ec)	标准试件	1	1	1
5	极限拉伸值(l)	标准试件	1	1	1
6	抗渗性(W)	标准试件	1	1	1
7	抗冻性(F)	标准试件	1	1	1

通过试验结果可知:

(1)三种不同掺量试件的抗压强度、劈拉强度、轴拉强度、极限拉伸值等均随龄期的增加而逐渐增大;抗压弹性模量、抗拉弹性模量随龄期增加表现出一定的波动性,变化规律不明显;

(2)三种砂岩掺量对胶结软岩抗剪断强度的影响不突出,但是对抗剪强度有一定的影响。180 d 龄期胶结软岩,抗剪摩擦系数随砂岩掺量增加而增大,其中砂岩掺量 70%时摩擦系数最大,掺

量 50%、60%时摩擦系数相差不大。

(3)三种不同掺量胶结砂砾石的抗渗性随着龄期的增加而增大,其中 70%掺量胶结砂砾石变化不太明显;70%掺量胶结砂砾石抗渗性最好,50%、60%次之,180 d 龄期胶结砂砾石抗渗等级能够达到 W4 等级,满足设计要求。

综上所述,砂岩骨料掺量为 50%、60%和 70%时,均可以配制满足设计强度要求的胶结砂砾石,掺配比例 50%与 60%砂岩的胶结砂砾石,

已成功应用于四川金鸡沟胶结坝工程,且两种胶结砂砾石均满足强度设计指标。

表 3 不同砂岩骨料掺配比例的胶结砂砾石材料性能

序号	胶结砂砾石性能指标	砂岩掺量	28 d 龄期	90 d 龄期	180 d 设计龄期	
1	抗压强度 /MPa	50%	6.4	9.8	11.4	
		60%	7.5	10.4	11.6	
		70%	12.9	19.2	21.1	
2	劈拉强度/MPa	50%	0.58	1.00	1.17	
		60%	0.78	1.01	1.06	
		70%	1.04	1.32	1.52	
180 d 设计龄期						
		/	f	c /MPa	f'	c' /MPa
3	抗剪强度(τ)	50%	1.323 1	1.853 3	1.631 1	0.139 6
		60%	1.934 2	1.938 7	1.703 8	0.280 9
		70%	1.614 9	3.268 7	2.688	0.278 2
4	弹性模量 /GPa	50%	7.4	10.9		8.5
		60%	11.9	13.7		8.3
		70%	13.1	13.2		13.6
5	极限拉伸值 (1×10^{-6})	50%	70	74		82
		60%	72	60		99
		70%	88	95		119
6	抗渗性(渗水高度) /mm	50%	>W4(141)	>W4(129)		>W4(83)
		60%	>W4(133)	>W4(89)		>W4(41)
		70%	>W4(57)	>W4(43)		>W4(45)
7	抗冻性(F)	50%	<F25(质损 11.25%)	<F25(质损 8.86%)		=F25(质损 3.69%)
		60%	<F25(质损 6.48%)	<F25(质损 4.31%)		\geq F25(质损 2.81%)
		70%	<F25(质损 5.62%)	>F25(质损 3.13%)		>F25(质损 1.24%)

3 试验坝体特性

为研究砂岩掺配比例对胶结坝体的影响特性,对砂岩掺量比例分别为 50%,60%,70%胶结试验坝体和砂岩掺量为 50%的胶结堆石试验坝体(采用掺量 50%的材料配合比)进行分析。

3.1 试验坝体施工工艺

试验坝体施工工艺为拌和,入仓,平仓摊铺,碾压,养护等。采用 JLB-200 专用拌和设备拌和,将拌和好的料入仓,平仓。采用大型自行式振动碾进行碾压,碾压参数为:柳工 620 型 20 t 单钢轮振动碾、压实厚度 50 cm、静碾 2 遍、振碾 8 遍;层间处理采用 M15 砂浆作为垫层,厚 10~15 mm,当下层胶结砂砾石已终凝,应用高压水冲毛处理后施工垫层。坝体的养护可采用喷水雾设施保持仓面湿润,确保胶结砂砾石的工作性不损失。

3.2 试验坝体密度分析

砂岩骨料掺配 50%、60%、70%和胶结堆石试验坝段各布置 2 组密度试验,采用灌水法,其试验成果见表 4。

表 4 试验坝体密度试验成果表

试验坝段	试样编号	湿密度 /g·cm ⁻³	含水率 /%	干密度 /g·cm ⁻³
砂岩骨料 50%	5:5-1	2.26	5.1	2.15
	5:5-3	2.28	5.6	2.16
砂岩骨料 60%	6:4-1	2.20	5.0	2.09
	6:4-2	2.20	5.4	2.09
砂岩骨料 70%	7:3-1	2.27	5.4	2.15
	7:3-3	2.25	5.1	2.14
胶结堆石	胶结堆石 1	2.30	5.8	2.17
	胶结堆石 3	2.31	5.7	2.18

由试验成果可知,砂岩骨料掺配 50%试验坝

体干密度达 2.16 g/cm^3 ,砂岩骨料 60% 掺配试验坝体干密度为 2.09 g/cm^3 ,砂岩骨料 70% 掺配试验坝体干密度为 2.14 g/cm^3 。砂岩胶结坝体整体干密度值虽较高,但其随着砂岩骨料掺量增加,干密度减小,均匀性变差。

3.3 试验坝体密实充填及胶结程度分析

通过地质雷达检测与坝体开槽方法,对不同砂岩骨料掺配比例以及砂岩掺量 50% 的胶结堆石坝体的密实充填程度和胶结程度进行了分析,见图 1~5。



图 1 砂岩掺量 50%

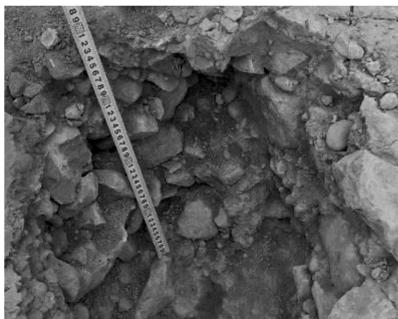


图 2 砂岩掺量 60%

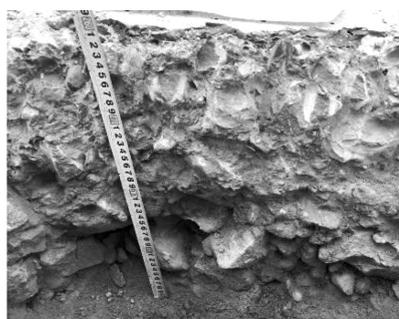


图 3 砂岩掺量 70%

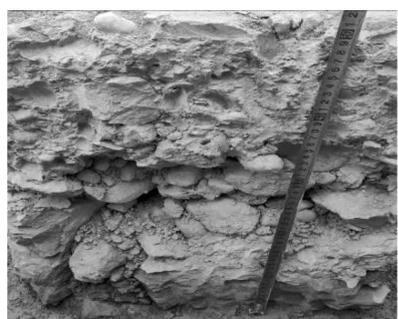


图 4 砂岩掺量 50% 胶结堆石

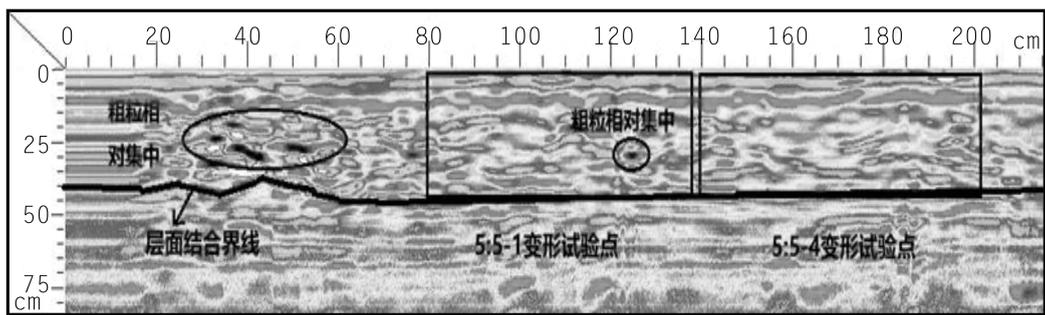


图 5 地质雷达扫描图(部分)

结果表明:砂岩骨料掺配 50% 的试验坝体,粗细骨料分布较均匀,嵌合程度较高,胶凝材料包裹较好。锤击胶结体声音较清脆,整体较密实;于胶结坝体中、下部位,或层面结合处,有粗骨料集中现象,最大砂岩骨料粒径为 70 mm,最大卵石粒径为 30 mm,粗粒径骨料呈半裸露状,被胶凝材料包裹率较低,锤击易散,胶结程度较差。

砂岩骨料掺配 60% 的试验坝体,粗细骨料分布有明显分界情况,以靠近表层 15 cm 处为界,上

界胶结体粗细骨料分布较均匀,嵌合程度较高,胶凝材料包裹较好,锤击不易散,有一定的胶结强度,具有较好密实度。下界胶结体粗骨料分布较集中,最大砂岩骨料粒径为 80 mm,最大卵石粒径为 40 mm,砂岩骨料与卵石骨料呈分离状,局部存在架空,嵌合程度低,被胶凝材料包裹少或无。骨料较易从胶结体剥离,胶结强度较低。且层面结合处局部胶结体呈散粒状,手捻易散,结合程度低,密实程度低。

砂岩骨料掺配70%的试验坝体,整体呈上密实下疏松状,胶结体表层至以下30 cm处,粗细骨料分布较均匀,碾压较密实。锤击胶结体,声音较清脆,见砂岩骨料破碎,具有一定的强度。胶结体下部粗骨料分布较集中,最大砂岩骨料粒径为100 mm,最大卵石粒径为40 mm,存在架空,骨料被胶凝材料包裹率较低,开槽至此段挖掘较易,用手可取出骨料,密实程度低,胶结程度较低。

砂岩骨料掺配50%的胶结堆石坝,粗细骨料分布较均匀,嵌合程度较高,胶凝材料包裹较好,锤击胶结体声音较清脆。破坏性锤击后,破坏面大多沿骨料胶结处破坏,可见砂岩骨料破裂,说明该坝体具有一定的胶结强度,整体较密实。在胶结材料与堆石结合处,胶结材料呈散粒状,与粗骨料结合差,易架空形成空洞。

综上所述:砂岩作为胶结体的主要骨料,经碾压后会被二次破碎,能较好的与砂卵石骨料嵌合,在胶凝材料的胶结作用下,与砂卵石混合形成具有一定强度的胶结体。胶结体随着砂岩骨料掺配比例的增加,粗粒径骨料集中现象越明显,骨料嵌合程度越低,胶结程度越差,密实程度也就相对较低。相对于上部胶结体,中下部胶结体受到的压实能量、骨料二次破碎程度以及经振动压实后重排列嵌合的程度均相对较低,导致砂岩胶结坝体总体呈上部密实下部相对疏松特征。经上述对比可知,50%砂岩骨料掺配比例的胶结坝体相对较密实,为最优掺配比例。

开槽工作发现,胶结坝体中存在架空、空洞,胶结差的部位,大多由于粗骨料集中、胶凝材料相对较少。说明砂岩与砂卵石混合骨料混合分布越均匀,胶凝材料包裹率越高,胶结坝体密实度越高。

砂岩骨料掺配50%的堆石坝相较于砂岩骨料掺配50%的胶结坝的特点具有相似性,但对于堆石坝的层面结合处,胶结材料呈散粒状,与粗骨料结合差,易架空形成空洞。

4 结 语

本文依托《四川省红层地区金鸡沟水库胶凝砂砾石坝现场变形剪切试验》项目,结合四川地区软岩分布广的特点,对不同砂岩掺配比例的胶结

坝特性进行了试验研究,得知:砂岩胶结坝体能满足中低坝的抗压、抗剪强度和抗渗强度等指标,相对水灰比和水泥的用量,砂岩掺配比例不同对胶结坝体的材料性能影响不显著;砂岩胶结坝体整体干密度值较高,随着砂岩骨料掺量增加,干密度减小,均匀性变差;砂岩胶结坝整体密实度较高,呈上部密实下部相对疏松特征,随着砂岩骨料掺配比例的增加,粗粒径骨料集中现象越明显,骨料嵌合程度越低,胶结程度越差,密实程度也就变得相对较低,50%砂岩骨料掺配比例为最优比例;

砂岩与砂卵石混合骨料混合分布越均匀,胶凝材料包裹率越高,胶结坝体密实度越高。

本文基于软岩砂岩骨料开展相关性研究,可为在四川红层砂岩地区推广应用胶结新坝型提供借鉴和参考。今后的研究可将泥岩、页岩、板岩砂质泥岩、泥质砂岩等作为骨料应用于胶结新坝型中,能极大丰富建坝可使用材料,突显“宜材适构”和“宜构适材”的设计理念。

参考文献:

- [1] Jia Jinsheng, Zheng Cuiying, Ma Fengling, et al. Studies on Cemented Material Dam and Its Application in China[C]// Proceedings of 6th International Symposium on Roller Compacted Dams. 2012.
- [2] 冯 炜.胶凝砂砾石坝筑坝材料特性研究与工程应用[D].中国水利水电科学研究院博士论文,2013,04.
- [3] 孙明权,杨世锋,柴启辉.胶凝砂砾石坝基础理论研究[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2011(4):43-45.
- [4] 中华人民共和国水利部.胶结颗粒料筑坝技术导则:SL 678-2014[S].北京:中国水利水电出版社,2014.
- [5] 贾金生,刘 宁,郑雅莹等.胶结颗粒料坝研究进展与工程应用[J].水利学报,2016(47):315-323.
- [6] 张小利.大同市守口堡水库大坝胶凝砂砾石的铺筑施工[J].山西水利科技,2016(4):42-44.
- [7] 陈振华,林胜柱,魏建忠,等.胶凝砂砾石筑坝技术新进展[J].水利科技,2011(4):29-32.

作者简介:

杨小奇(1990-),男,四川资阳人,工程师,建筑与土木工程专业硕士研究生,从事水利水电工程施工方面的工作;
彭明亮(1972-),男,四川隆昌人,高级工程师,从事岩土试验研究方面的工作;
胡人炭(1960-),男,浙江淳安人,教授级高工,从事水利水电工程物探应用与研究方面的工作。

(责任编辑:吴永红、卓政昌)