

胶凝砂砾石筑坝材料特性研究*

Review of Research on Properties of Cemented Sand Gravel Materials

王 冉, 龚爱民, 邵善庆

(云南农业大学 水利学院, 云南 昆明 650201)

摘 要: 胶凝砂砾石是一种介于混凝土与堆石料之间的新型筑坝胶凝材料, 具有节约资源、降低造价、保护环境等优点, 对胶凝砂砾石材料的特性研究是坝体结构设计的关键, 目前对于胶凝砂砾石材料的特性研究缺少较为全面的认识。为使胶凝砂砾石材料更好的应用于实际工程, 因此通过文献查阅, 本文总结了胶凝砂砾石材料的力学性能和冻融环境下的材料耐久性等方面试验研究, 对胶凝砂砾石材料特性受胶材用量、单位用水量、水胶比、砂率、龄期等多种参数的影响规律进行综合分析, 为胶凝砂砾石筑坝材料的进一步研究和应用提供理论基础。

关键词: 胶凝砂砾石; 材料; 力学特性; 耐久性

中图分类号: TV43 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2024) 01-0063-07

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2024.01.012

WANG Ran, GONG Aimin, SHAO Shanqing

(College of Water Conservancy, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China)

Abstract: Cementitious sand and gravel is a new type of dam cementing material between concrete and rockfill. It has the advantages of saving resources, reducing cost and protecting environment. The study of the characteristics of cementitious sand and gravel materials is the key to the design of dam structure. At present, there is a lack of comprehensive understanding of the characteristics of cementitious sand and gravel materials. In order to make the cementitious sand and gravel material better applied to practical engineering, through literature review, this paper summarizes the mechanical properties of cementitious sand and gravel materials and the durability of materials under freeze-thaw environment are summarized, and the characteristics of cementitious sand and gravel materials are comprehensively analyzed by the influence of various parameters such as rubber dosage, unit water consumption, water-glue ratio, sand rate, age, etc., so as to provide a theoretical basis for further research and application of cementitious sand and gravel damming materials.

Keywords: cemented sand gravel; material science; mechanical properties; durability

0 引言

自然界中存在着大量的河床沉积砂砾石, 通过对其加入胶凝材料 (水泥、粉煤灰等) 实施改性而形成筑坝材料——胶凝砂砾石 (CSG) 材料, 这种材料可就地取材, 施工时不存在温控, 有减少成本和减少对环境污染等优点^[1], 并且在结构上有抗震性好、防渗性能好等优势。

在现代水利工程中, CSG 材料近十几年受到广

* 基金项目: 云南省教育厅科学研究基金项目 (2022Y286); 云南农业大学科技创新创业行动基金 (2022ZKX098)。

作者简介: 王冉 (1998—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向: 水工材料。

通信作者: 龚爱民 (1962—), 男, 本科, 教授, 硕士生导师, 主要研究方向: 水工材料。

收稿日期: 2023-09-20

材料科学

泛关注。据资料统计,国外胶凝砂砾石工程就有 10 多座,学者主要集中在 CSG 材料的性能及筑坝技术研究,并且较为成熟,得到各界广泛的认可,表 1 为国外采用 CSG 材料筑成的永久性 CSG 工程。参考大量相关文献资料发现,国内则对于 CSG 材料的特性研究尚浅,尤其是对 CSG 材料筑坝特性的应用研究上,没有系统全面的知识体系^[2],表 2 为国内利用胶凝砂砾石材料筑坝工程。2006 年我国学者贾金生^[3]对胶凝砂砾石材料的强度特性、渗透特性及胶凝砂砾石坝进行了首次较具体的相关性研究;通过对各学者研究的总结分析,结合我国现有情况,大部分学者认为胶凝砂砾石与混凝土材料的特性归结于一类,也有少部分学者认为胶凝砂砾石材料特性与土的特性存在紧密的联系^[4-7]。

表 1 国外胶凝砂砾石工程
Table 1 Foreign cemented sand and gravel projects

国家	工程名称	建成/年	高/m	上游坡比	下游坡比
希腊	马拉蒂亚	1993	28	1 : 0.5	1 : 0.5
	安诺美拉	1997	32	1 : 0.5	1 : 0.5
法国	斯马丁-德隆德雷斯	2005	25	—	—
土耳其	辛德雷	2005	107	1 : 0.7	1 : 0.7
	中空	2007	100	1 : 0.7	1 : 0.7
	长岛	1993	33	—	—
日本	桑鲁	—	50	1 : 0.8	1 : 0.8
	金	2013	62	1 : 0.8	1 : 0.8

表 2 国内胶凝砂砾石工程
Table 2 Domestic cemented sand and gravel projects

工程名称	高/m	建成/a	上游坡比	下游坡比	砂砾石构成
街面水电站 下游围堰	16.3	2004	1 : 0.4	1 : 0.96	河床砂砾石
飞仙关水电站 一期纵向围堰	12.0	2013	1 : 0.6	1 : 0.6	河床砂砾石
云南大华侨 围堰	57.0	2015	1 : 0.5	1 : 0.6	河床砂砾石
顺江堰	11.6	2016	铅直	1 : 0.6	河床砂砾石
守口堡水库	64.6	2018	1 : 0.6	1 : 0.6	坝基开挖料
金鸡沟水库	33.0	2020	1 : 0.35	1 : 0.75	河床砂砾石

为能够更好地利用 CSG 材料筑坝,本文详细阐述了胶凝砂砾石材料力学性能和耐久性受不同因素影响的变化规律,总结分析近些年胶凝砂砾石材料试验(力学试验、耐久性试验)结果,掌握胶凝砂砾石材料试验参数、力学特点和耐久性规律,为胶凝砂砾石筑坝材料研究积累理论基础,对建设胶凝砂砾石工程提供理论依据。

1 胶凝砂砾石材料试验研究

胶凝砂砾石材料试验研究是分析 CSG 筑坝材料性能的前提,为能保证经济效益最大化,施工便捷,因此对材料进行了水胶比、单位用水量等试验研究,得到各设计参数范围标准,为后续探索 CSG 材料力学性能和耐久性能提供数据支持。

(1) 水胶比试验研究。1995 年,孙明权等^[8-11]对胶凝砂砾石料进行了大量研究,得出水胶比是影响超贫胶结材料力学性能的主要因素,最佳水胶比范围在 0.8~1.2;2007 年,彭成山等^[12]提出了水胶比是影响超贫胶结材料配合比参数之一;杜双全等^[13]结合实际工程,试验分析人工合成胶凝砂砾石的工程性质,确定最优配合比。

(2) 水泥、骨料粒径及单位用水量试验研究。Xu 等^[14]研究单位水泥含量和骨料最大粒径对水泥砂和砂砾石材料抗压强度的影响,得出当骨料最大粒径为 40 mm 且单位水泥含量在 80 kg/m³以上时,可以保证材料抗压强度;2022 年,吴海燕^[15]利用正交试验,得到胶凝砂砾石料的单位用水量对工作性能的影响最大,单位粉煤灰用量对强度影响最大,砂率对工作性能和力学性能的则影响不明显。

(3) 密度试验研究。2020 年,刘宗棋等^[16]对金鸡沟工程中胶凝材料密实度做了研究,在水泥 60 kg/m³、粉煤灰 60 kg/m³、用水量 80 kg/m³的情况下进行配选,得到砂石每增加 10%其表观密度减小 0.5%,砂岩骨料粒径对胶凝砂砾石表观密度影响约 5%且掺量不超过 60%的结论;闫林等^[17]在国内外配合比设计试验的相关研究下,利用最大密度实验法和丁朴荣理论公式法对三种胶凝砂砾石进行混合级配的设计,通过配合比及实测密度参数,得出当胶材用量超过 100 kg/m³时,力学性能与混凝土存在密切联系。

(4) VC 值试验研究。2015 年,陈彬兴^[18]对顺江堰胶凝砂砾石坝材料进行了配合比和性能的分析,分析了胶凝砂砾石料的用水量与 VC 值的关系,对胶凝砂砾石的碾压、施工、振捣配合比等作出了实验分析,最后采用胶凝材料 110 kg/m³,其中水泥用量为 68 kg/m³且符合 C₁₈₀10 的设计要求;胶凝砂砾石材料的 VC 值和轧制参数是控制其压实度因素。赖韩等^[19]在研究材料 VC 值敏感性分析时,从 W、C、F、

S 四个因素进行分析, 得出在施工时尤其考虑单位用水量 (W), 砂率 (S) 几乎可以忽略, 图 1 是影响 VC 值的四个因素, 从图中看出砂率对 VC 值影响不明显, 单位用水量影响 VC 值比较明显且 VC 值在 9.5~15.5 范围内变化; 王晋瑛^[20]则对守口堡水库筑坝材料进行性能实验分析, 得出加减水剂可以提升材料强度, 最终配合比为胶凝材料水泥 (强度等级 42.5) 用量 50 kg/m^3 , 粉煤灰 (Ⅱ级) 用量 40 kg/m^3 , 石料粒径不大于 150 mm , 用水量为 $90 \sim 120 \text{ kg/m}^3$ 。

在我国, 胶凝砂砾石材料主要应用于中小型坝以及围堰上, 试验研究表明: 围堰工程上砂砾石的最大粒径为 300 mm , 而在坝体工程上砂砾石的粒径控制在 150 mm 以下, 水泥用量 $40 \sim 80 \text{ kg/m}^3$, 用水量为 $70 \sim 120 \text{ kg/m}^3$, 粉煤灰用量为 $40 \sim 60 \text{ kg/m}^3$, 单位用水量对 VC 值影响较大, 一般为 $5 \sim 10 \text{ s}$, 最优水胶比为 1.0, 施工控制时应着重注意单位用水量, 不同工程其所用的砂砾石材料不同, 具体工程具体研究。

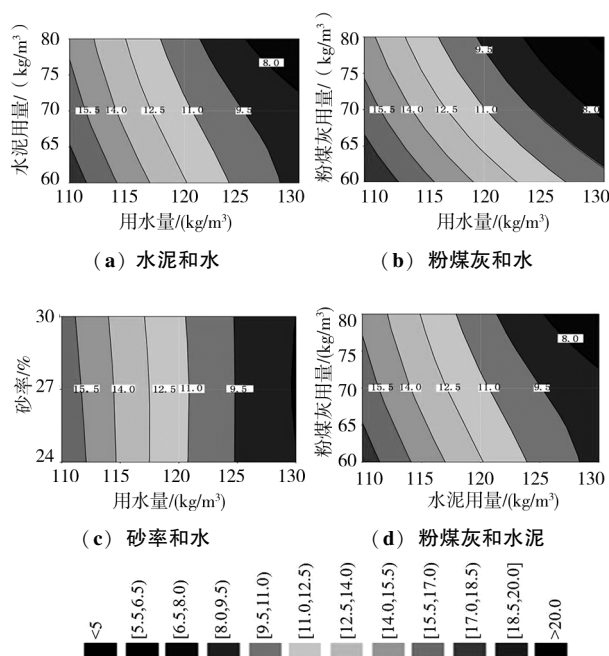


图 1 VC 值与任意两个影响因素的等值线
Fig. 1 The contour between the VC value and any two influencing factors

2 胶凝砂砾石材料性能研究

2.1 材料力学性能研究

胶凝砂砾石作为一种新型材料, 是典型的弹塑性材料, 根据国内外试验研究^[21], CSG 材料的性

能是在混凝土性能与砂石料性能之间的材料, 其抗压强度、弹性模量都低于混凝土, 应力-应变曲线与混凝土相似^[22-23]。CSG 材料性能是介于砂石料和混凝土之间, 日本有学者表明混凝土、胶凝砂砾石及岩石材料的应力-应变关系, 如图 2^[24]所示, 胶凝砂砾石弹性模量一般小于 5 MPa , 在结构设计时一般只考虑其弹性过程。

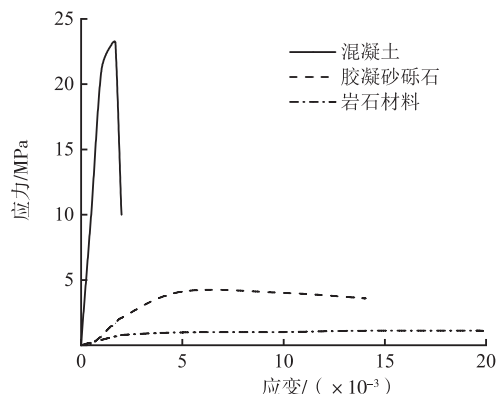
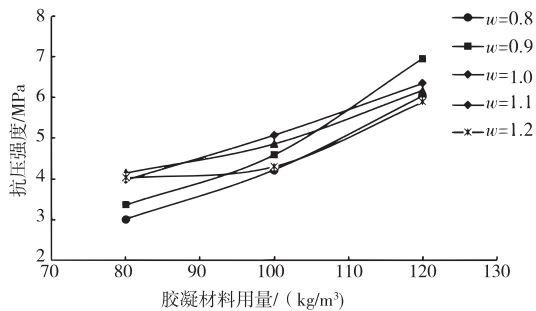


图 2 应力-应变关系^[24]
Fig. 2 Stress-strain relationship^[24]

(1) 胶材用量对强度的影响。2007 年, 孙明权^[11]对超贫胶结材料 (胶凝材料用量小于 60 kg/m^3) 进行大型三轴试验, 得到不同胶材用量下的应力-应变关系曲线, 且应力-应变曲线处于混凝土与堆石料之间, 弹性模量小于 5 MPa ; 同年, 彭成山等^[12]对超贫胶结材料特性研究时, 得到水灰比是主要影响参数之一, 并对不同水泥含量的超贫胶结材料进行不同围压的三轴压缩试验, 得到材料应力应变曲线开始处于线性关系, 达到峰值后为非线性关系; 2013 年, 刘录录^[25]利用正交试验得出材料的胶材用量、龄期与抗压强度成正比关系; 闫林等^[26]通过前期配合比设计不同胶材用量、水胶比对抗压强度的影响, 也得出其间存在正比例关系, 当水胶比为 0.9 时, 随着胶材用量增加, 抗压强度增长速度较快, 当胶凝材料为 120 kg/m^3 时, 此时抗压强度达到最大, 约为 7 MPa , 如图 3 所示。

(2) 水胶比及龄期对材料强度影响。孙明权等^[8-11]对胶凝砂砾石料进行了大量研究, 得到水胶比是影响超贫胶结材料力学性能的主要因素, 最佳水胶比范围在 $0.8 \sim 1.2$; 2007 年, 彭成山等^[12]提出了水胶比是影响超贫胶结材料配合比参数之一; 韩立炜等^[27]研究得出, 水胶比是影响胶凝砂砾石抗压强度的重要影响因子之一, 最优水胶比下材料强度

材料科学

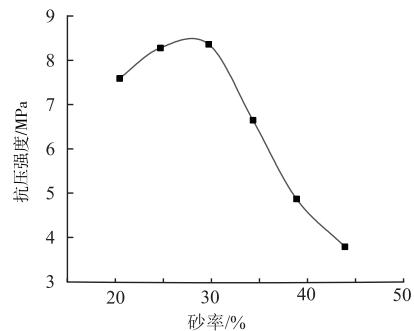
图3 胶材用量与抗压强度的关系^[26]Fig. 3 Relationship between rubber dosage and compressive strength^[26]

最高,当胶材用量增加,最优水胶比减小,且随着龄期的增加胶凝砂砾石抗压强度逐渐提高;宋文浚^[28]在守口堡工程现场模拟胶凝砂砾石坝的填筑、碾压试验,切割立方体大试件养护180、230及369 d检测其抗压强度,得出在230 d、369 d时,抗压强度均达到6 MPa的要求且性能得到很好的发挥结果;通过金鸡沟水库现场的大量试验^[29],得到胶凝砂砾石28 d时的抗压强度范围为9.9~10.7 MPa;Chai等^[30]在研究龄期对胶凝砂砾石材料的影响时,得出材料龄期为90 d的抗压强度比28 d时提高10%~30%,强度随着龄期增长不断增大。

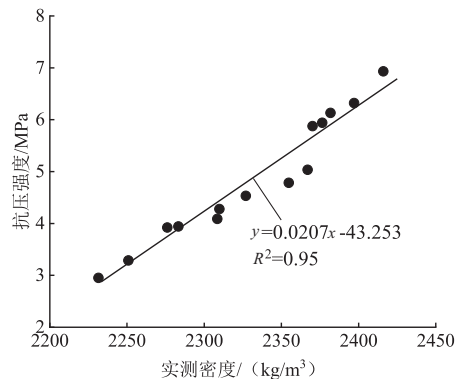
(3) 粉煤灰对材料强度的影响,在胶凝砂砾石材料中粉煤灰起到减水剂的作用,减少了用水量,且随着龄期的增加,材料强度提高显著。2016年,亢晓龙^[31]通过研究粉煤灰对胶凝砂砾石力学性能的影响,得到材料强度随着粉煤灰的增加而提高,且Ⅰ级粉煤灰对于材料强度的提高优于Ⅱ级粉煤灰;李思蕾^[2]开展了该材料在不同粉煤灰掺量及硅粉掺量的单轴压缩及劈拉试验,得出抗压、抗拉强度均随掺量增加而增大。2020年,赖韩^[19]通过田口方法、数理统计方法对胶凝砂砾石料进行力学特性研究,得出粉煤灰是影响抗压强度的主要原因。Chai等^[30]通过研究粉煤灰掺量对胶凝砂砾石材料的抗压强度影响,得出当粉煤灰掺量为胶凝材料总量的50%时为最优掺量。

(4) 不同砂率对材料强度影响。陈守开等^[32]利用响应面法对胶凝砂砾石抗压强度因素研究得到砂率相较于水胶比与粉煤灰掺量而言,影响力较小,合适砂率为20%;冯炜^[33]研究得出当砂率范围15%~30%时,材料的抗压强度逐渐增大,当砂率超过30%时,随着砂率的增加,胶结能力变差导致空

隙增大,这时抗压强度急剧下降;2017年,李记明等^[34]以守口堡水库工程为依托,也研究不同砂率下对胶凝砂砾石强度影响,当砂率低于30%时,材料抗压强度随砂率的增加而提高,当砂率等于30%时抗压强度达到峰值,当砂率超过30%时,胶凝砂砾石试件在28 d标准养护下的抗压强度,出现急剧下降。如图4所示。

图4 胶凝砂砾石砂率与抗压强度关系曲线^[34]Fig. 4 Relationship curve between cemented sand and gravel sand rate and strength^[34]

胶凝砂砾石料除胶凝掺量对材料力学性能影响明显以外,细骨料(<5 mm)掺量同样也最为明显影响,因此控制砂率及胶砂比,对提升材料力学性能具有重大的意义。2018年,武晓菲^[35]通过对守口堡水库三个不同砂率的配比进行抗压强度测试,得出粗骨料对富浆胶凝砂砾石试件的抗压强度无显著影响;但有关研究表明,通过控制砂率可以保证材料的密实性,提升材料强度并优化施工质量。砂率与密度具有密切相关性,目前在材料密度的研究上,闫林等^[26]通过研究不同配比的胶凝砂砾石材料密度和抗压强度,得出了材料的密度与抗压强度(图5)成正比例关系。

图5 密度与抗压强度关系^[26]Fig. 5 Relationship between density and compressive strength^[26]

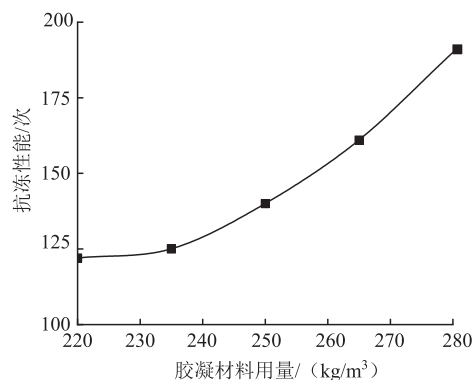
综上所述, 胶凝砂砾石材料在实验室内通过材料力学试验, 在不同影响因素下进行抗压、抗劈拉、加卸载试验, 得到胶凝砂砾石抗压强度与其之间的变化规律。胶材用量、龄期与抗压强度成正比, 粉煤灰为总量的 50% 时为最优掺量, 最优砂率为 25% 左右。在此研究基础上也有学者通过对其加入纤维、掺合料等以此改善力学性能, 提高材料强度。金光日^[36]则研究了 PVA 纤维的掺入提高了胶凝砂砾石材料的力学性能, 从材料最初的脆性破坏变为延性破坏。对于胶凝砂砾石抗压强度的提高, 未来可深入研究。

2.2 材料耐久性研究

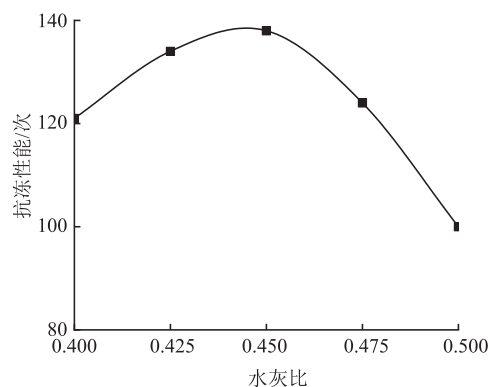
材料的耐久性也是国家关注的重点之一, 决定了工程使用寿命的长短, 水工材料由于经常受到水环境的作用, 会面临一定的侵蚀或破坏, 导致材料保护层损坏以至于影响工程结构稳定性, 为提高该材料的耐久性, 近些年在试验研究中常通过抗冻性、抗渗性去研究材料的耐久性。

(1) 胶凝砂砾石冻融试验研究。2014 年孙明权等^[37]在实际工程条件下, 结合仿真分析研究了在温度变化及冻融环境下的胶凝砂砾石材料, 得出材料耐久性影响的变化规律并提出相应工程保护措施; 2018 年, 曹京京等^[38]研究不同的冻融循环次数、不同水胶比、不同龄期下胶凝砂砾石料的抗冻性; 2021 年, 管子^[39]对胶凝砂砾石料进行冻融循环, 从宏观和微观两个方面研究分析变化规律; 刘红森等^[40]通过快速冻融试验及灰色关联度理论, 得出材料中影响抗冻性的因素; 闫林等^[26]研究胶凝砂砾石材料的胶凝材料用量、水灰比、细料含量与抗冻性能之间联系, 如图 6 所示。根据图 6 可以看出, 随着胶材用量的增加, 抗冻性能也不断增加; 水灰比增大到 0.45 时, 抗冻性能达到最高, 超过 0.45 时, 抗冻性能逐渐减小; 随着细料含量的增加, 其抗冻性能不断增大。

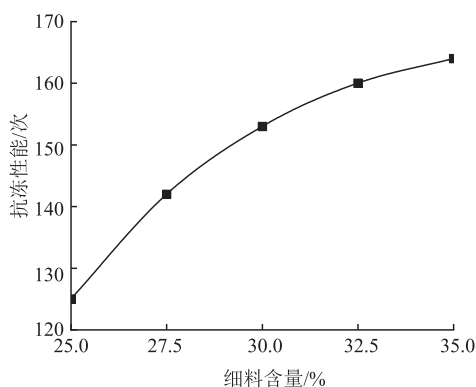
(2) 胶凝砂砾石渗透性试验研究。杨志斌^[41]对胶凝砂砾石进行了渗透性试验研究, 得出水泥是影响渗透性的主要因素, 其次是砂率、水胶比、粉煤灰; 王晓强^[42]对胶凝砂砾石的渗透溶蚀做了初步的探讨, 得出材料的渗透性与渗透溶蚀性存在相关性, 随着龄期增加, CaO 溶出量不断增加, CaO 浓度先上升后下降, 从而降低了材料的力学性能。



(a) 胶凝材料用量



(b) 水灰比



(c) 细料含量

图 6 胶凝材料用量、水灰比、细料含量与抗冻性能关系^[26]

Fig. 6 Relationship between the dosage of cementitious materials, water cement ratio, fine material content, and frost resistance performance

(3) 提高材料耐久性的方法。2012 年冯炜等^[43]对山西守口堡水库大坝进行了抗渗、抗冻试验研究, 得到胶凝砂砾石中掺入外加剂可以有效提高防渗性能和抗冻性能; 俞长隆^[44]则是在不同粉煤灰掺量下研究其抗冻性, 适量的粉煤灰对抗冻性有一定的提升; 王天格^[45]在研究中得出掺加外加剂可以提高胶

材料科学

凝砂砾石的耐久性;车南雪^[46]则在胶凝砂砾石中添加环氧树脂,提高了胶凝砂砾石料的冲磨性;张栋^[47]将 PCCA 外加剂掺入胶凝砂砾石中提高了材料抗冻性;王明华^[48]将聚羧酸减水剂、引气剂(十二烷基硫酸钠、三萜皂苷)、氧化石墨烯、纳米硅粉外加剂进行不同比例的掺合,加入到胶凝砂砾石料中有效提高了材料耐久性;2022 年,师现营等^[49]为提升胶凝砂砾石的耐久性,利用正交实验,得出水胶比和粉煤灰掺量是影响冻融后质量损失的主要因素,并提供优化后的配合比。

胶凝砂砾石材料的耐久性研究目前主要以抗冻性、抗渗性体现出来。研究表明:胶材用量、水灰比对耐久性的影响较大,胶材用量、细料含量与抗冻性成正比;细料的填充使得材料密度增大,因此能够提升材料的耐久性;当水灰比最优时,此时抗冻性能较高,水灰比也是影响耐久性的主要因素之一。因此,通过对耐久性变化规律的探究,掺入外加剂、纤维等可更好的提高材料耐久性。

3 结论与展望

胶凝砂砾石材料属于新型材料,具有很强竞争力,通过对胶凝砂砾石材料的特性研究综述,可以得出以下结论:

(1) 通过试验研究胶凝砂砾石材料的特性已有多种,相对成熟,方法居多,其中砂率对材料影响不大,单位用水量对材料影响较大,特别是控制材料压实度上,单位用水量研究较多,在施工控制时应着重注意单位用水量,不同工程所用的砂砾石材料不同,具体工程具体研究。

(2) 胶凝砂砾石材料的力学性能与龄期、胶材用量、水胶比、密度为正相关关系,当砂率超过 30% 时会使材料的力学性能下降。为使材料力学性能发挥最佳,控制胶凝材料用量为 120 kg/m^3 左右,粉煤灰为总胶凝材料用量的 50% 左右,砂率为 25% 左右,水灰比 1.0 左右;通过控制胶材用量、水胶比或掺外加剂、纤维等提高力学性能指标。

(3) 胶凝砂砾石材料的耐久性与胶材用量、细料含量为正相关关系,水灰比超过适量值时则耐久性变差,胶材用量和水灰比则是影响耐久性的主要因素;掺入外加剂、纤维等可更好的提高材料耐久性。

随着社会政策制度的发展,对水利工程的要求不断变高,而胶凝砂砾石坝不仅在材料上有极大的优势,在结构上也有显著的特点。对本研究领域的展望如下。

(1) 河床沉积砂砾石加入胶凝材料得到的胶凝砂砾石材料目前具有广阔的市场前景,对胶凝砂砾石材料的试验研究和充分利用胶凝砂砾石筑坝具有重要的意义。

(2) 胶凝砂砾石材料的性能研究中,可以看出对材料力学性能、耐久性能提升的这一部分存在些许空白,设计合理的提升材料性能的试验方法对 CSG 材料的筑坝推广和筑坝结构设计极为重要。

参 考 文 献

- [1] 蔡新,杨杰,郭兴文.胶凝砂砾石坝研究综述[J].河海大学学报(自然科学版),2015,43(5):431-441.
- [2] 李思蕾.胶凝砂砾石力学性能及损伤机制研究[D].郑州:华北水利水电大学,2021.
- [3] 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(5):578-582.
- [4] CAI X, WU Y, GUO X, et al. Research review of the cement sand and gravel (CSG) dam [J]. Frontiers of Structural and Civil Engineering, 2012, 6: 19-24.
- [5] ZHANG C, TANG H, DEWALS B J, et al. A systematic procedure to predict flows induced by major dysfunctions on complexes or cascades of dams [C] //: Springer, 2009: 1868-1873.
- [6] 林一山.林一山治水文集[M].长江出版社,2011:47-72.
- [7] G U RDIL A F, BATMAZ S. Structural design of cindere dam [C] //, 2018: 439-446.
- [8] 孙明权,杨世锋,张镜剑.超贫胶结材料本构模型[J].水利水电科技进展,2007(3):35-37.
- [9] 孙明权,孟祥敏,肖晓春.超贫胶结材料坝剖面形式研究[J].水利水电科技进展,2007(4):40-41.
- [10] 孙明权,彭成山,陈建华,等.超贫胶结材料坝非线性分析[J].水利水电科技进展,2007(4):42-45.
- [11] 孙明权,彭成山,李永乐,等.超贫胶结材料三轴试验[J].水利水电科技进展,2007(4):46-49.
- [12] 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(2):26-29.
- [13] 杜双全,范适生.胶凝砂砾石的工程性质分析[J].水运工程,2021(12):125-128.
- [14] XU T, JIN G. Effects of unit cement content and aggregate maximum particle size on compressive strength of cemented sand and gravel materials [C] //: IOP Publishing, 2020: 12203.

- [15] 吴海燕. 胶凝砂砾石材料特性及填筑工艺研究 [J]. 水利科技与经济, 2022, 28 (1): 151-155.
- [16] 刘宗棋, 胡人炭, 彭明亮, 等. 砂岩+卵石混合骨料胶凝材料坝密实度影响因素探讨 [J]. 四川水利, 2020, 41 (3): 9-13.
- [17] 闫林, 何建新, 杨海华. 胶凝砂砾石配合比设计研究与工程应用 [J]. 人民黄河, 2020, 42 (2): 85-88.
- [18] 陈彬兴. 胶凝砂砾石坝材料配合比和性能分析 [J]. 吉林水利, 2015 (10): 12-14.
- [19] 赖韩. 基于田口方法的胶凝砂砾石材料特性研究 [D]. 西安: 西安理工大学, 2020.
- [20] 王晋瑛. 守口堡水库胶凝砂砾石坝设计与研究 [J]. 山西水利科技, 2015 (1): 1-4.
- [21] BATMAZ S. Cindere dam-107 m high roller compacted hardfill dam (RCHD) in Turkey [M] // RCC Dams - Roller Compacted Concrete Dams. Routledge, 2018: 121-126.
- [22] GAO L. The non-linear uncoupled KG model for rockfill materials and its verification [C] // , 1999: 103-108.
- [23] LONDE P. The faced symmetrical hardfill dam: a new concept for RCC [J]. Water Power and Dam Construction, 1992: 19-24.
- [24] HIROSE T, FUJISAWA T, YOSHIDA H, et al. Concept of CSG and its material properties [C] // , 2018: 465-473.
- [25] 刘录录. 胶凝砂砾石材料物理力学性能研究及有限元分析 [D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2013.
- [26] 闫林, 何建新, 杨海华. 富胶凝砂砾石材料抗压及抗冻性能研究 [J]. 水资源与水工程学报, 2019, 30 (1): 197-202.
- [27] 韩立伟, 杨志斌, 郭磊. 水胶比对胶凝砂砾石抗压强度影响规律研究 [J]. 人民黄河, 2021, 43 (5): 124-127.
- [28] 宋文浚. 守口堡水库胶凝砂砾石筑坝试验研究 [J]. 中国水能及电气化, 2017 (1): 49-51.
- [29] 白文斌. 胶凝砂砾石筑坝施工关键技术浅析 [J]. 四川水利, 2019, 40 (4): 97-99.
- [30] CHAI Q, WAN F, XIAO L, et al. The influence of fly ash content on the compressive strength of cemented sand and gravel material [J]. Crystals, 2021, 11 (11): 1426.
- [31] 亢晓龙. 粉煤灰对胶凝砂砾石力学性能的影响研究 [D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2016.
- [32] 陈守开, 符永淇文, 别亚静. 胶凝砂砾石抗压强度影响因素分析 [J]. 人民黄河, 2020, 42 (11): 126-129.
- [33] 冯炜. 胶凝砂砾石坝筑坝材料特性研究与工程应用 [D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2013.
- [34] 李记明, 史小波. 守口堡水库胶凝砂砾石之砂率试验研究 [J]. 水利建设与管理, 2017, 37 (5): 32-35.
- [35] 武晓菲. 守口堡水库胶凝砂砾石筑坝材料强度试验研究 [J]. 水利建设与管理, 2018, 38 (8): 26-28.
- [36] 金光日, 方涛, 王俊锋, 等. PVA 纤维掺和胶凝砂砾石材料的力学性能研究 [J]. 长江科学院院报, 2018, 35 (9): 148-153.
- [37] 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), 2014, 35 (2): 43-46.
- [38] 曹京京, 王忠伟. 不同冻融循环次数下胶凝砂砾石抗冻性能的试验研究 [J]. 水电能源科学, 2018, 36 (9): 127-129.
- [39] 管子. 胶凝砂砾石材料冻融损伤特性研究 [D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2021.
- [40] 刘红森, 杨世锋, 郭利霞, 等. 胶凝砂砾石冻融试验及影响因素分析 [J]. 水电能源科学, 2019, 37 (3): 100-102.
- [41] 杨志斌. 胶凝砂砾石渗透特性试验研究 [D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2021.
- [42] 王晓强. 胶凝砂砾石坝材料的渗透溶蚀研究及工程应用 [D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2005.
- [43] 冯炜, 贾金生, 马锋玲. 胶凝砂砾石坝坝体和保护层材料的耐久性能研究 [C] // 第八届全国混凝土耐久性学术交流会, 中国浙江杭州, 2012.
- [44] 俞长隆. 不同粉煤灰掺量对胶凝砂砾石强度和抗冻性能的影响 [J]. 陕西水利, 2021 (5): 22-24.
- [45] 王天格. 适用于胶凝砂砾石的复合外加剂 [J]. 农家参谋, 2019 (12): 203.
- [46] 车南雪. 环氧树脂胶凝砂砾石材料抗冲磨性能试验研究 [J]. 水利科学与寒区工程, 2021, 4 (6): 34-37.
- [47] 张栋. PCCA 添加剂对胶凝砂砾石材料抗冻性影响的试验研究 [J]. 水电站机电技术, 2021, 44 (8): 84-86.
- [48] 王明华. 复合外加剂对胶凝砂砾石抗冻耐久性的研究 [D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2021.
- [49] 师现营, 李晓南, 陈平平. 胶凝砂砾石材料抗冻性研究及配合比优化设计 [J]. 人民黄河, 2022, 44 (5): 142-146.