

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20230316

水库底泥制备透水混凝土的抗压强度及透水性能

李彦苍, 张子鹤, 张春元, 石华旺, 冯胜雷

(河北工程大学土木工程学院, 河北 邯郸 056038)

摘要: 为提高水库底泥在建筑材料领域的附加值利用率, 将水库底泥作辅助胶凝材料制备透水混凝土, 发现水库底泥掺量的增加会使试件抗压强度下降, 透水性能提高; 机械活化时间的延长会使试件抗压强度增大, 透水性能降低。当水灰比为 0.3、机械活化时间为 45 min 时, 制备的水库底泥透水混凝土 28 d 抗压强度可达 21.44 MPa, 透水系数为 0.56 mm/s。该研究为水库底泥在建筑材料领域的资源化利用提供了参考。

关键词: 水库底泥; 透水混凝土; 抗压强度; 透水性能; 机械活化

中图分类号: TU528

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)12-0160-04

1 引言

透水混凝土作为一种新型透水材料应用于海绵城市建设, 不仅可以缓解城市内涝压力, 还有利于水资源的循环利用^[1]。水库底泥是由有机化合物、无机矿物和泥沙等混合物在物理、化学和生物长期作用下沉积于水库底部而形成的不规则非均质体。然而, 水库底泥长期的积存会造成水库寿命缩短和水库蓄水量下降。水库底泥的化学成分与水泥相似, 主要以 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 为主, 因此考虑将水库底泥作为辅助胶凝材料制备透水混凝土, 以此消纳水库底泥, 减少水库底泥的堆存, 降低二氧化碳排放和水泥生产成本, 助力实现国家“2030 碳达峰”和“2060 碳中和”的远景目标^[2]。为有效利用水库底泥制备建筑材料, 多通过化学活化法、机械活化法和热活化法^[3]来激发水库底泥的潜在火山灰活性。如王少奎^[4]将底泥烘干研磨, 进行高温煅烧处理后制备水泥砂浆; FERONE C 等^[5]证明了煅烧后的水库底泥可制备聚合物胶凝材料; JUNAKOVA N 等^[6]发现 NaOH 碱激发条件下水库底泥试件的力学性能有所下降, 而经过机械研磨后替代水泥率 40%, 并掺加粉煤灰的条件下, 试件养护 28 d 后的抗压强度最高可达到 20 MPa 以上。热活化和机械活化都可以有效激发

水库底泥的火山灰活性, 但化学活化对制备试件的力学性能有负影响, 热活化较机械活化对资源消耗更大, 不符合绿色可持续发展理念, 相对而言机械活化是提升水库底泥活性的环保且经济的方法之一。目前研究多将底泥做辅助胶凝材料来制备砂浆、陶粒、混凝土等^[7], 而基于水库底泥制备透水混凝土的研究较少。鉴于此, 本文通过设定 3 种水灰比和单一目标孔隙率探究水库底泥掺量和机械活化时间对透水混凝土抗压强度和透水系数的影响, 旨在为水库底泥制备透水混凝土提供参考。

2 研究方法

通过 X 射线衍射光谱 (XRD) 和 X 射线荧光发射谱 (XRF) 分析河北省邯郸市岳城水库底泥的物相组成和化学成分。在设计水灰比 0.26、0.28、0.30 及目标孔隙率 20% 的基础上, 单掺水库底泥 (等质量替代水泥) 10%、20%、30%, 研究不同掺量对试件抗压强度和透水系数的影响。在保持试件性能且最大化利用水库底泥条件下, 利用激光粒度仪分析机械活化时间 (15、30、45 min) 对水库底泥粒度分布的影响, 探究机械活化时间对水库底泥透水混凝土抗压强度和透水系数的影响。

收稿日期: 2023-02-06, 修回日期: 2023-03-27

基金项目: 国家自然科学基金项目 (U21A20164); 河北省自然科学基金项目 (E2020402079); 邯郸市科学技术研究与发展计划项目 (SJ2101003131)

作者简介: 李彦苍 (1974-), 男, 博士、教授, 研究方向为固体废弃物资源化利用, E-mail: liyancang@hebeu.edu.cn

通讯作者: 冯胜雷 (1980-), 男, 博士、讲师, 研究方向为新型建筑材料、固体废弃物资源化利用, E-mail: fengshenglei@hebeu.edu.cn

2.1 原材料

(1)水库底泥。选用邯郸市岳城水库底泥,密度为 2.68 g/cm³,含水率为 23.5%。图 1 为水库底泥的 XRD 图谱,可以看出水库底泥的主要矿物成分为石英、钠长石、钙长石、白云母、蛇纹石和伊利石。水库底泥的化学成分见表 1,其主要化学成分为 SiO₂、Al₂O₃、CaO、Fe₂O₃。

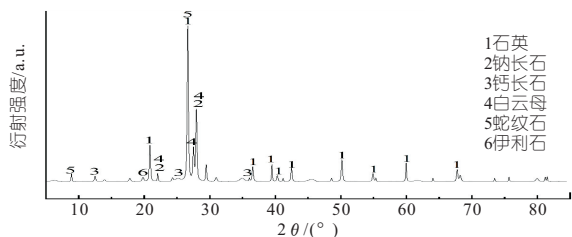


图 1 水库底泥的 XRD 图谱

Fig. 1 XRD pattern of reservoir sediment

表 1 水库底泥和水泥的 XRF 分析结果

Tab. 1 XRF analysis results of reservoir sediment and cement %

试样	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	SO ₃	其他
水泥	18.10	5.85	3.92	64.40	1.93	1.20		0.34	3.37	1.66
水库底泥	60.84	15.30	6.97	8.93	1.80	2.90	1.07	1.29	0.42	0.48

(2)水泥。选用山东省诸城市杨春水泥有限公司生产的 P·O 42.5 水泥,比表面积为 360 m²/kg,初凝时间≥45 min,终凝时间≤600 min,28 d 抗压强度≥49.0 MPa。水泥化学成分见表 1。

(3)粗骨料。选用单一粒径为 4.75~9.50 mm 的黑色玄武岩砾石,堆积密度为 1 688 kg/m³,表观密度为 2 777 kg/m³,孔隙率为 39%。

(4)拌合用水。利用河北省邯郸市自来水厂提供的饮用水。

(5)减水剂。利用天津伟合科技发展有限公司提供的聚羧酸型高效减水剂,减水率为 30%,固含量为 39.2%,pH 值为 6.1。

2.2 透水混凝土配合比设计

根据《透水水泥混凝土路面技术规程》(CJJ/T 135-2009)^[8]提供的体积法进行配合比设计,水库底泥透水混凝土材料配合比见表 2。

表 2 水库底泥透水混凝土配合比

Tab. 2 Mix ratio of reservoir sediment pervious concrete

测试组	水灰比	水库底泥掺量/%	材料用量/(kg·m ⁻³)			
			粗骨料	水	水库底泥	水泥 减水剂
1	0.26	10	1 654	129.74	49.9	449.1 3.00
2		20	1 654	129.74	99.8	399.2 3.00
3		30	1 654	129.74	149.7	349.3 3.00
4	0.28	10	1 654	137.48	49.1	441.9 2.95
5		20	1 654	137.48	98.2	392.8 2.95
6		30	1 654	137.48	147.3	343.7 2.95
7	0.30	10	1 654	145.20	48.4	435.6 2.90
8		20	1 654	145.20	96.8	387.2 2.90
9		30	1 654	145.20	145.2	338.8 2.90

2.3 试件制备

采用水泥裹石投料法^[9],人工插捣后装入 100 mm×100 mm×100 mm 的试模中,填充密实后,用刮刀抹平放入标准养护室(温度 20 °C±2 °C,相对湿度≥95%)进行养护。

2.4 机械活化

使用湿磨的方式^[10],利用行星式球磨机对水库底泥进行机械活化,活化介质为质量约 1 g、直径 2 mm 的氧化锆球,球料质量比为 2 : 1;分散剂为聚乙二醇和无水乙醇,聚乙二醇掺量为水库底泥质量的 0.3%,水库底泥和无水乙醇的质量比为 2 : 1。研磨速率设定为 800 r/min,研磨时间设为 15、30、45 min。研磨后,在 110 °C 烘干并过 80 目的方孔筛备用。

2.5 透水系数测试

根据《透水混凝土》(JC/T2558-2020)^[11]附录 A 中定水头法测试养护 28 d 试件的透水系数,每个试件测试 3 次,取平均值。

2.6 抗压强度测试

按照《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T 50081-2019)^[12]来测试养护 7、28 d 试件的抗压强度,以 0.5 MPa/s 的速度均匀连续地加载直至试件破坏,每组测试 3 个试件。

3 水库底泥制备透水混凝土的抗压强度及透水性能

3.1 掺量对水库底泥透水混凝土性能的影响

3.1.1 水库底泥掺量对透水混凝土抗压强度的影响

图 2 为水库底泥不同掺量下对透水混凝土 7、28 d 抗压强度的影响。由图 2 可看出,随着水库底泥掺量的增加,每组水灰比下的试件养护 7、28 d 的抗压强度均呈下降趋势,这是因为水库底泥的掺入会使水泥浆体占比变小,从图 1 知水库底泥的主要物相为石英晶体,未活化的水库底泥活性较低,对浆体水化反应促进效果不大,水库底

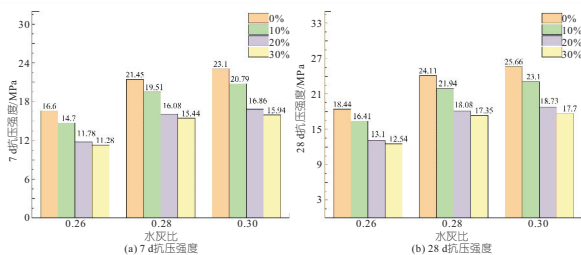


图 2 水库底泥掺量下试件 7、28 d 的抗压强度

Fig. 2 The compressive strength of specimens at 7, 28 d with reservoir sediment contents

泥—水泥浆体包裹住骨料且在骨料表面水化产物较少,故骨料之间的粘结力较纯水泥浆体水化产物产生的粘结力弱,从而使试件抗压强度不断降低。

3.1.2 水库底泥掺量对透水混凝土透水性能的影响

图 3 为水库底泥不同掺量对透水混凝土 28 d 透水系数的影响。由图 3 可知,3 组水灰比下试件的透水系数随着水库底泥掺量的增加而增大。这是由于未磨的水库底泥颗粒形状不规则,表面疏松多孔,粒径较水泥大,骨料之间连通孔隙变多,连通空隙与透水系数呈正相关关系^[13],因而试件的透水系数持续增大。

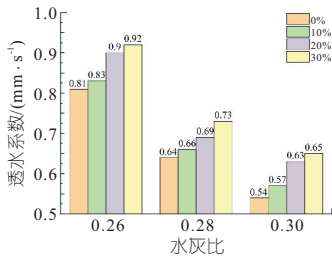


图 3 水库底泥掺量下试件 28 d 的透水系数

Fig. 3 The permeation coefficient of specimens at 28 d with reservoir sediment contents

3.2 机械活化时间对水库底泥透水混凝土性能的影响

以水库底泥掺量对试件抗压强度和透水性能的结果分析为基础,为了提升试件的性能且保证水库底泥最大化资源利用,水库底泥掺量设为 30%,进一步探究不同机械活化时间对试件的抗压强度和透水系数的影响。

3.2.1 机械活化时间对水库底泥粒径分布的影响

图 4 为不同机械活化时间下水库底泥的比表面积。由图 4 可知,随着机械研磨时间的延长,水库底泥比表面积从 146.5 m²/kg 增大到 612.55 m²/kg。这是因为水库底泥颗粒在初期受到颗粒之间和磨球之间的机械力作用发生脆性破坏,水库底泥表面的断口和裂纹更容易破碎^[14],颗粒细化,大量的新鲜表面形成。

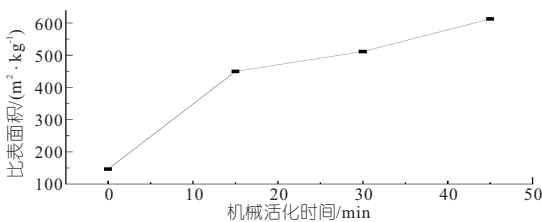


图 4 机械活化下的水库底泥比表面积

Fig. 4 Specific surface area of reservoir sediment under mechanical activation

图 5 为机械活化时间对水库底泥粒径分布和累计分布的影响。由图 5 可看出,机械活化时间

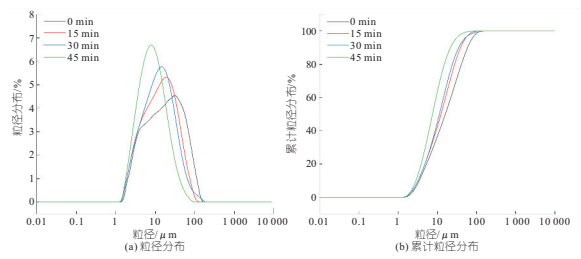


图 5 机械活化时间对水库底泥粒径分布和累计分布的影响

Fig. 5 Effect of mechanical activation grinding time on particle distribution and cumulative distribution of reservoir sediment

在 0~45 min 时,粒径 0~3、0~10、0~40 μm 的累计占比分别为 6.36%~10.23%、36.4%~63.23%、78.91%~97.98%;粒径 >40 μm 的占比从 21.09%减小到 2.02%。当机械活化时间为 45 min 时,0~40 μm 的粒径占比为 97.98%。随着研磨时间的增加,水库底泥颗粒粒径分布曲线逐渐向左移动,这是因为机械活化可以减小水库底泥颗粒粒径,同时晶粒细化,粒径分布变化主要为大颗粒减少和小颗粒增多。

3.2.2 机械活化时间对水库底泥透水混凝土抗压强度的影响

图 6 为机械活化时间对水库底泥透水混凝土不同龄期抗压强度的影响。由图 6 可知,机械活化条件下水灰比 0.3 的试验组 28 d 抗压强度最高,3 种机械活化时间的水库底泥透水混凝土较未活化水库底泥透水混凝土的抗压强度提高了 12%、15.5%、21.1%。研磨 45 min、水库底泥掺量 30%、水灰比 0.3、目标孔隙率 20% 的试件抗压强度达到 21.44 MPa。随着机械活化时间的延长,试件的抗压强度也均匀缓慢增长。这是由于在机械活化时,水库底泥颗粒与磨球之间相互挤压碰撞产生的高能机械力使水库底泥玻璃体从团聚变为解聚,大颗粒粉碎成小颗粒,晶粒细化,进而颗粒的比表面积不断增大,提供了更多的水化反应面积,从而提高反应活性。随着时间的推移,水泥—水库底泥浆体中大量的 Ca²⁺ 与水中的

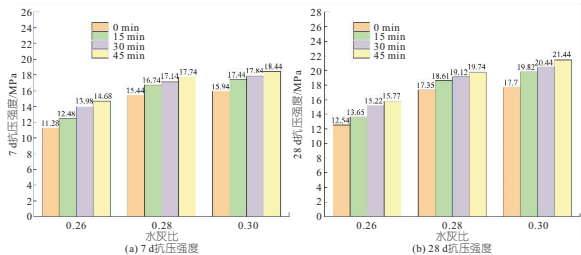


图 6 机械活化时间下试件 7、28 d 的抗压强度

Fig. 6 The compressive strength of specimens at 7 d and 28 d with mechanical activation time

OH^- 结合形成氢氧化钙($\text{Ca}(\text{OH})_2$), 水库底泥中的石英晶体结构被破坏, 结晶度降低并趋于非晶化, 在水库底泥颗粒比表面积增大基础上颗粒反应活性进一步提高, 由此产生的活性 SiO_2 可以与水泥水化生成的 CH 发生二次水化反应^[15], 生成水化硅酸钙(C-S-H)凝胶并附着在水库底泥颗粒表面, C-S-H 的含量越多, 水库底泥透水混凝土的抗压强度也越高。

3.2.3 机械活化时间对水库底泥透水混凝土透水性能的影响

图 7 为机械活化时间对水库底泥透水混凝土 28 d 透水性能的影响。由图 7 可看出, 3 种水灰比下每个机械活化时间中透水性能与机械研磨时间成反比, 随着机械活化时间延长, 透水系数不断减小, 符合《透水水泥混凝土路面技术规程》(CJJ/T 135-2009)^[8] 要求。这是因为试件的透水性能受掺入水库底泥粒度的影响, 水库底泥经过粉磨后, 比表面积不断增大, 粒径不断减小, 在填充水泥颗粒后, 发生了“微填料效应”^[16], 进而水化产物填充连通孔隙使试件内部结构越致密, 因此连通孔隙率越小, 渗透性越低。

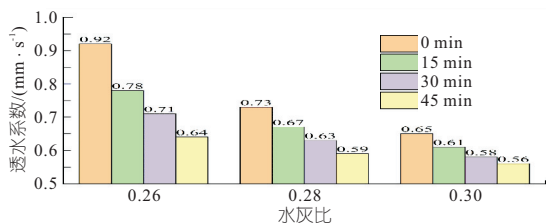


图 7 机械活化时间下试件 28 d 的透水系数

Fig. 7 The permeation coefficient of specimens at 28 d with mechanical activation time

4 结论

a. 随着水库底泥掺量的增加, 28 d 透水混凝土的抗压强度较不掺水库底泥的透水混凝土不断降低, 透水性能逐渐提高。

b. 随着机械活化时间延长, 28 d 透水混凝土的抗压强度较水库底泥未活化组不断提高, 透水性能逐渐减弱。

c. 当水库底泥掺量 30%、机械活化 45 min 时制备的透水混凝土 28 d 抗压强度最大, 达到 21.44 MPa, 透水系数为 0.56 mm/s, 符合相关规范要求。

参考文献:

[1] 石立国, 杜焱, 文韬, 等. 海绵城市建设中的透水混凝土性能及应用效果[J]. 中国给水排水, 2019,

35(12): 39-43.

- [2] 王运敏, 张松波, 代碧波, 等. 金属非金属矿业减碳路径与工程科技[J]. 金属矿山, 2023(1): 1-7.
- [3] 朴春爱, 王栋民, 张力冉, 等. 化学-机械耦合效应对铁尾矿胶凝活性的影响[J]. 应用基础与工程科学学报, 2016, 24(6): 1100-1109.
- [4] 王少奎. 不同煅烧温度处理污泥灰对水泥砂浆性能影响研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- [5] FERONE C, LIGUORI B, CAPASSO I, et al. Thermally treated clay sediments as geopolymer source material[J]. Applied clay science, 2015, 107: 195-204.
- [6] JUNAKOVA N, JUNAK J. Sustainable use of reservoir sediment through partial application in building material[J]. Sustainability, 2017, 9(5): 852.
- [7] BEDDAA H, TCHIOTSOP J, FRAJ A B, et al. Reuse of river sediments in pervious concrete: Towards an adaptation of concrete to the circular economy and climate change challenges[J]. Construction and building materials, 2023, 268: 130443.
- [8] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 透水水泥混凝土路面技术规程: CJJ/T 135-2009[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- [9] 范伟. 透水混凝土研究进展[J]. 材料导报, 2017, 31(增刊 2): 413-416.
- [10] 梁志鹏, 孙畅, 毕万利, 等. 高硅型铁尾矿机械活化效果及机理研究[J]. 硅酸盐通报, 2022, 41(8): 2810-2818.
- [11] 中华人民共和国工业和信息化部. 透水混凝土: JC/T 2558-2020[S]. 北京: 中国建材工业出版社, 2020.
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 国家市场监督管理总局. 混凝土物理力学性能试验方法标准: GB/T 50081-2019[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
- [13] 韩刚, 于天得, 孙语晨, 等. 再生骨料透水混凝土动态断裂数值模拟研究[J]. 水电能源科学, 2020, 38(8): 104-108.
- [14] MEJDOUB R, HAMMI H, KHITOUNI M, et al. The effect of prolonged mechanical activation duration on the reactivity of Portland cement: Effect of particle size and crystallinity changes[J]. Construction and building materials, 2017, 152: 1041-1050.
- [15] YANG X, ZHAO L, HAQUE M A, et al. Sustainable conversion of contaminated dredged river sediment into eco-friendly foamed concrete [J]. Journal of cleaner production, 2020, 252: 119799.
- [16] FEDIUK R S. Mechanical activation of construction binder materials by various mills[C]//IOP conference series: materials science and engineering, 2016, 125(1): 012029.

