

渠道护坡混凝土物化损伤作用下 力学特性

谷 静, 王 霄, 陈 超, 齐春舫, 仲召伟

(淮安市水利勘测设计研究院有限公司, 江苏 淮安 223005)

摘要:为研究二干渠护坡塑性混凝土材料受物化损伤作用后拉、压力学变化特征,设计开展了浸泡时间、溶液浓度的多因素力学破坏试验。浸泡时间、溶液浓度与混凝土抗拉强度、抗压强度均为负相关关系,且浸泡浓度与抗压强度具有负比例线性函数关系,浸泡时间为 24 h 与 72 h 时溶液浓度 2 g/L 试样抗拉强度差幅为 20.1%,而抗压强度差幅为 37.5%,在浸泡时间 24 h 试验组下,溶液浓度增长 2 g/L,试样抗拉强度、抗压强度分别平均减少 20.6%、15.2%。浸泡时间愈长,物化损伤效应愈显著,且抗压强度受物化损伤影响敏感度低于抗拉强度。物化损伤程度不影响峰值拉伸或压缩破坏后仍具有一定抗拉、抗压能力。

关键词:二干渠;混凝土;物化损伤;力学

中图分类号:U656.2

文献标识码:A

文章编号:1007-7839(2022)07-0021-0005

Mechanical properties of canal slope protection concrete under physicochemical damage

GU Jing, WANG Xiao, CHEN Chao, QI Chunfang, ZHONG Zhaowei

(Huai'an Water Conservancy Survey and Design Research Institute Co., Ltd., Huai'an 223005, China)

Abstract: In order to study the characteristics of tensile and pressure changes of the plastic concrete material for slope protection in the second main canal after physicochemical damage, a multi-factor mechanical failure test of soaking time and solution concentration was designed and carried out. The immersion time and solution concentration are negatively correlated with the tensile strength and compressive strength of concrete, and the immersion concentration has a negative proportional linear function relationship with the compressive strength. When the immersion time is 24 h and 72 h, the difference of tensile strength of the sample with solution concentration of 2 g/L is 20.1%, while the difference of compressive strength is 37.5%. In the test group with immersion time of 24 h, the solution concentration increases by 2 g/L, and the tensile strength The compressive strength decreased by 20.6% and 15.2% respectively. The longer the soaking time is, the more obvious the physicochemical damage effect is, and the sensitivity of compressive strength affected by physicochemical damage is lower than that of tensile strength. The degree of physicochemical damage does not affect the peak tensile or compressive failure, but still has a certain tensile and compressive capacity.

Key words: the second main canal; concrete; physicochemical damage; dynamics

收稿日期:2021-09-15

作者简介:谷静(1989—),女,工程师,本科,主要从事水利设计工作。E-mail:wmae35@163.com

水工结构安全稳定性不仅与水工设计水平息息相关^[1-2],同样水工材料力学水平对结构运营稳定性亦有较大影响^[3-4],因而,推动水利材料力学特性研究在水工设计中具有重要意义。徐俊等^[5]、刘璇等^[6]、刘国华等^[7]认为水工材料中典型的混凝土、岩土体等材料,均可属于颗粒流类材料,因而引入颗粒流离散元仿真计算手段,通过设计离散元模型的单、三轴仿真试验,研究获得了不同属性参数影响下颗粒流模型的力学特征,为工程设计提供了基础力学依据。当然,岩石与混凝土材料的破坏过程与其内部裂隙的扩展密切相关,故在一些水利隧洞等工程中安装相应的微震监测仪器^[8-9],及时预判工程失稳前兆。室内力学试验乃是一种精度较高、方法较成熟的研究手段,通过对岩石、混凝土或土体等材料进行室内加工打磨,设计开展单轴、三轴及渗透等力学耦合试验^[10-11],可较宏观获得材料的力学水平,提升水利材料工程应用标准。本文根据二干渠护坡材料工程环境,设计模拟水流侵蚀作用下混凝土的力学加载试验,为二干渠输水工程护坡材料的应用提供参考。

1 试验概况

1.1 工程背景

二干渠为来龙灌区主要灌水渠道之一,西起井头泵站,东至宿沭界张圩闸,全长26.14 km。流径有多个水利控制枢纽,包括有泄洪闸与排沙闸等重要水工设施,监测表明渠道含沙量最大不超过 3.5 kg/m^3 ,输水枢纽降淤排污作用显著。渠首为井头泵站,设计流量 $80\text{ m}^3/\text{s}$,出水池设计水位20.0 m。渠底宽40~80 m,渠底高程17.00~15.60 m,渠底比降1:20 000;渠顶高程22.50~22.00 m,边坡1:2.5,北堤结合宿沭公路,顶宽15 m;南堤顶宽4~5 m;渠堤脚处铺设0.3 m厚度的碎石填土层,局部渠段加设土工防渗膜,有效降低输水损耗率,亦可抑制渠底渗流活动。二干渠两侧分布3条分干渠和7条支渠,灌溉总六塘河左岸塘湖、曹集、来龙、新庄、保安、关庙、大兴、丁嘴等乡镇2.11万 hm^2 农田。现状二干渠为土质渠道,以曹集乡为界,曹集以西段土质为砂壤土夹淤泥质黏土,透水性超过 $3.5\times 10^{-4}\text{ cm/s}$,松散程度较高,易受地表径流影响,发生冲刷流失,对渠基础抗滑移特性乃是较大威胁。以东段为黏土,颗粒粒径以2.75 mm为主,局部土层级配较好,压实效果较佳,但承载力较低,现场标贯测试表明,土体属较低等持力层,不利于渠坡抗倾覆稳定性。二干渠

灌溉面积大,输水线路长,渠道沿线特别是曹集以西段边坡存在坍塌现象,渠道工程完好率仅为23.4%,有效防护渠道边坡完整性与功能完好性,乃是输水渠道安全管理的重要考量方面。二干渠乃是区域内重要水利枢纽设施,保障二干渠输水稳定性乃是工程设计与管理的工作重点,为此,对二干渠纵、横断面进行“升级”设计,在满足渠首设计流量要求的前提下,设计渠道渗透比降为120 000,整体提升输水渠道边坡稳定性。从二干渠渠坡防护角度考虑,设计采用塑性混凝土硬化护坡,并搭配以植物绿化网格,有效提升工程绿色设计标准。另一方面,硬化混凝土作为坡面材料,在长期的水质物化侵蚀作用下,当受静、动水压力影响,会产生局部裂缝,而裂纹的扩展根源主要与混凝土的拉、压应力特性有关,因而工程试验部门考虑先期对塑性混凝土开展物理损伤作用下拉、压力学试验。

1.2 试验介绍

为确保混凝土拉、压力学试验结果的可靠性,本文采用GDS-RTS岩石三轴试验系统开展力学加载破坏试验,该试验系统配备有程序加载控制设备、数据采集与处理设备及程序实时控制系统。该试验系统加载部分可根据试样尺寸配备不同加载盘,适应多类型、多尺寸参数试样力学试验,本文所有试样的尺寸直径、高度均分别为75 mm、150 mm。加载系统也可根据实验要求更换不同传感器量程与加载装置。数据采集设备可设置采集间隔最小为0.01s,本试验中数据采集间隔为0.5 s,各数据设备包括有轴向、环向变形传感器及机器位移监测仪器,可根据试验要求对各试验数据进行整理分析。本试验中所采用的轴向、环向传感器均已标定,试验数据采集误差不超过0.1%。试验采集过程中,数据处理设备可实时给出试样力学状态参数,基于状态参数,试验人员可调整试验进程,而荷载加载方式可选择力学与变形控制^[12],本文压缩试验前期弹性变形阶段采用力学加载方式,速率为 15 kN/min ,后转成变形控制加载,速率为 0.006 mm/min ,而拉伸试验全程均采用变形控制。利用该试验设备分别对二干渠护坡混凝土材料进行拉、压力学试验。

由于本试验中需模拟渠道内水质侵蚀作用下混凝土拉、压力学特性,因而设计在试验前对试样进行人工预制物化损伤,当所有混凝土制备、加工打磨后,放在NaCl盐溶液中浸泡一定时间,完成前期盐溶液侵蚀物化损伤试验后,再进行拉、压力学试验。本试验中设定盐溶液溶度试验组分别为 0 g/L

(自然养护状态)、2 g/L、4 g/L、6 g/L、8 g/L,而浸泡时间分别设定为24 h、48 h、72 h 3个对比组,所有塑性混凝土试样均保持取样、制样统一。本文各试验组具体参数方案如表1所示。

表1 试验方案具体参数

试样编号	浸泡时间/h	盐溶液浓度/(g·L ⁻¹)
C1-1~C1-5	24	0(自然养护状态)、2、4、6、8
C2-1~C2-5	48	0(自然养护状态)、2、4、6、8
C3-1~C3-5	72	0(自然养护状态)、2、4、6、8

2 混凝土拉伸力学特性

2.1 荷载变形特征

根据物化损伤后塑性混凝土的拉伸力学破坏试验,获得不同浸泡溶液浓度的混凝土试样拉伸应力变形特征,如图1所示。从图1可知,在相同浸泡时间下,盐溶液浓度愈高,则混凝土试样拉伸应力水平愈低,在浸泡时间24 h试验组中,自然养护状态下试样在拉伸变形1.5 mm时对应的拉伸荷载为

29.45 kN,而相同拉伸变形下的盐溶液浓度2 g/L、6 g/L、8 g/L试样的拉伸荷载较前者分别减少了38.4%、64.3%、69.8%,表明浸泡盐溶液浓度愈大,则塑性混凝土受物化损伤作用愈强,试样内部颗粒骨架稳定性受“打击”愈大,反映在拉伸荷载上则是降低的特性^[13-14]。当浸泡时间增大至72 h后,各试样拉伸荷载水平整体减小,但物化损伤作用与拉伸荷载关系仍基本一致,各试样间拉伸荷载差异有所增大;在拉伸变形1.5 mm时盐溶液浓度2 g/L、8 g/L试样拉伸荷载与自然养护状态下差幅分别为45.2%、81.3%;表明浸泡时间愈长,浸泡溶液浓度对混凝土物化损伤作用影响增强。从拉伸变形可知,相同浸泡时间下各试样峰值拉伸变形以低浓度下为最大,在浸泡24 h试验组中溶液浓度0~8 g/L的5个试样的峰值变形分别为3.14 mm、2.82 mm、2.64 mm、2.46 mm、2.31 mm;另一方面,各试样最大拉伸应变基本保持一致,塑性混凝土试样在峰值应力后期均有稳定变形阶段,即不论物化损伤程度多大,峰值拉伸荷载破坏后的塑性混凝土仍具有一定承拉能力。

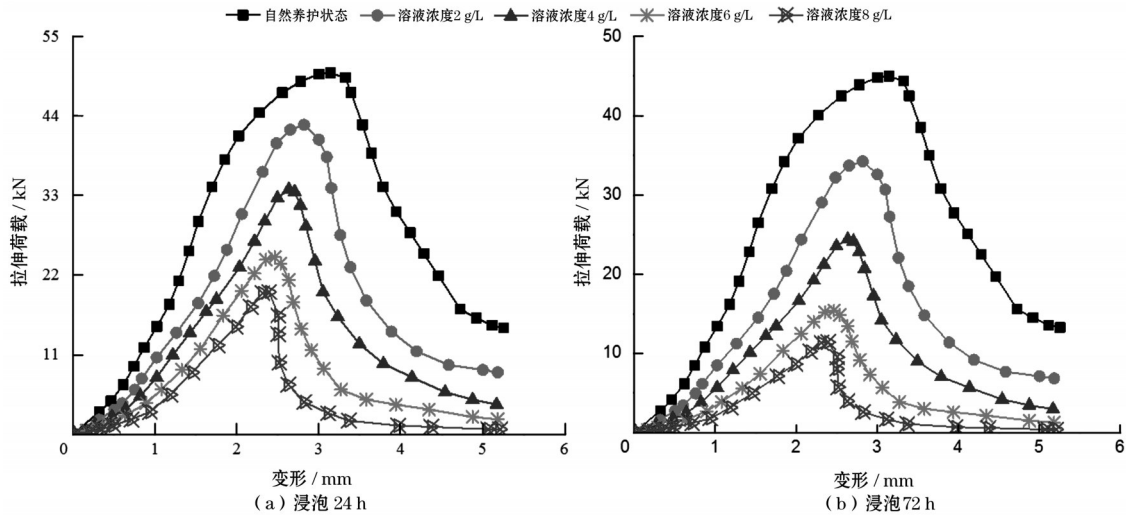


图1 物化损伤后混凝土拉伸荷载变形特征

2.2 抗拉强度特征

基于拉伸力学破坏试验,获得不同浸泡时间、溶液浓度影响下混凝土抗拉强度变化特征,如图2所示。从图2可知,浸泡时间、溶液浓度与混凝土抗拉强度均具有负相关关系,当浸泡时间为24 h时,溶液浓度2 g/L试样的抗拉强度为42.8 kN,而浓度4 g/L、8 g/L的试样抗拉强度相比前者分别降低了20.8%、54%,在该浸泡时间试验组中,溶液浓度增长

2 g/L,则试样抗拉强度平均减少20.6%。浸泡时间增大至72 h后,溶液浓度2 g/L试样抗拉强度较之24 h下减少了20.1%,而该浸泡时间试验组中,随溶液浓度增长,试样抗拉强度平均损失28.8%。分析表明,当浸泡时间延长,物化损伤作用加剧,混凝土抗拉强度整体降低,不同溶液浓度间试样的抗拉强度差距亦拉大,笔者认为此与物化“慢性”损伤作用有关,浸泡时间愈大,浸泡浓度的差幅愈可体现。

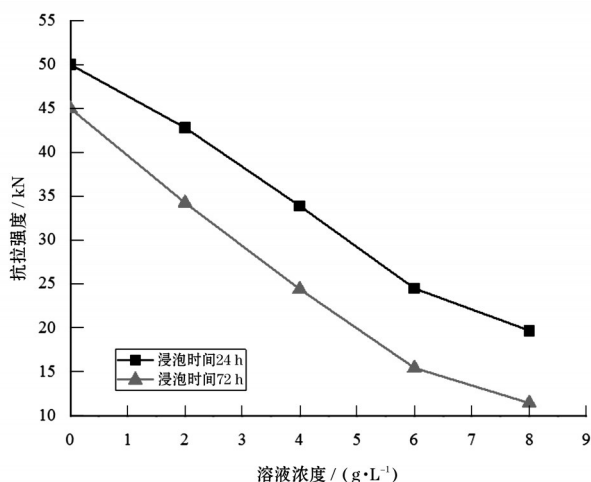


图2 物化损伤作用下混凝土抗拉强度特征

3 混凝土压缩力学特性

3.1 应力应变特征

混凝土作为一种抗压材料,其经历物化损伤作用后的压缩应力应变特征,如图3所示,本文以浸泡时间48 h为典型试验组分析。从应力应变整体特征可知,浸泡溶液浓度与压缩应力同样为负相关关系,表明物化损伤作用愈强,塑性混凝土试样的拉、压应力水平都会降低。当浸泡溶液浓度为2 g/L时,应变1%时试样的加载应力为23.33 MPa,而溶液浓度为4 g/L、8 g/L试样相同加载应变下的应力较前者分别减少了26.6%、58.2%。笔者认为,在盐溶液中浸泡一定时间,混凝土试样内部的碱性活性分子会受到化学进程影响,对其颗粒骨架稳定性、密实度均是较大“损害”,故其压缩应力水平亦降低^[15-16]。从塑性混凝土在二干渠输水工程中应用方面可知,

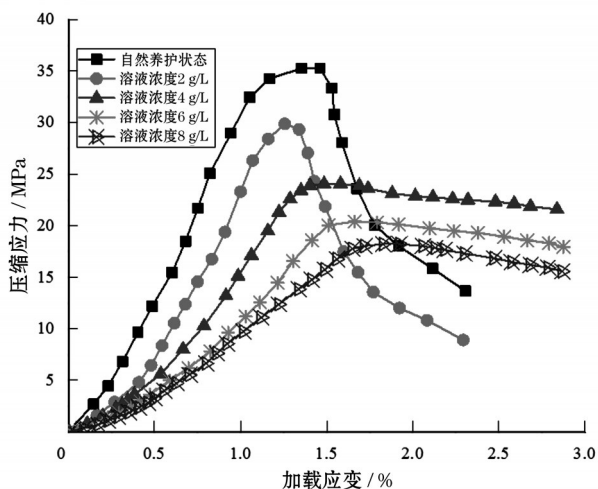


图3 物化损伤后混凝土压缩应力应变特征

应控制渠道水位线,降低护坡混凝土材料受水溶液侵蚀物化损伤作用,且应降低水渠中COD等化学元素含量,控制水中微量元素,从源头降低护坡材料受物化损伤影响。比较图5中5个试样的应变特征可知,浸泡溶液浓度增大,试样的峰值应变增大,且试样峰值应力后期区域呈软化特征,应力下降幅度减小。浸泡溶液浓度2 g/L试样的峰值应变为1.26%,而破坏后应力降幅为70.1%,当溶液浓度为6 g/L、8 g/L时,峰值应变分别为1.66%、1.92%,且峰后降幅分别仅为12.1%、13.6%。分析表明,浸泡溶液浓度增大后,物化损伤形成的内部孔隙在不断压实作用下,其具有应变硬化特征,长期维持有较大抗压性能。

3.2 抗压强度特征

同理,获得浸泡溶液浓度、浸泡时间影响下塑性混凝土抗压强度变化特征,如图4。从图4可知,浸泡浓度、浸泡时间对混凝土抗压强度影响关系与抗拉强度一致,且前者与之具有线性函数关系。在浸泡时间24h时,溶液浓度为2 g/L的试样抗压强度为29.9 MPa,而浓度4 g/L、6 g/L、8 g/L试样抗压强度较前者分别减少了19.5%、31.7%、39%,随溶液浓度增大,该浸泡时间下试样抗压强度平均损耗15.2%。当浸泡时间增长至72 h后,其浓度2 g/L试样抗压强度较24 h、48 h下分别降低了37.5%、24.3%,而在该浸泡时间下,试样抗拉强度随溶液浓度平均降低22.5%。分析表明,塑性混凝土抗压强度受浸泡溶液浓度影响敏感度高于抗拉强度。结合二干渠护坡材料应用场景,笔者认为,除应控制渠道水位与水质成分,也应控制渠坡面受静水压力影响,减弱水力冲刷对混凝土护坡材料抗压强度的损耗。

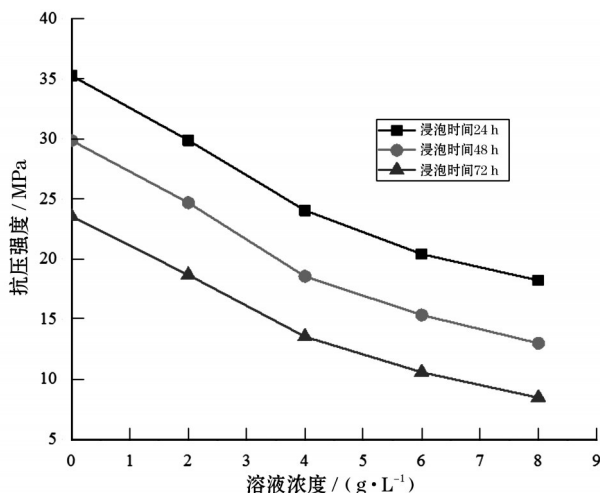


图4 物化损伤作用下混凝土抗压强度特征

4 结 论

本文主要得到以下3点结论:

(1)浸泡时间、溶液浓度与混凝土抗拉强度均具有负相关关系,浸泡时间为24 h与72 h时溶液浓度2 g/L试样抗拉强度差幅为20.1%,且在此两浸泡时间试验组下,溶液浓度增大2 g/L,试样抗拉强度平均减少20.6%、28.8%,浸泡时间愈长,物化损伤效应愈显著。

(2)浸泡浓度与混凝土抗压强度具有负比例线性函数关系,浸泡时间同样与抗压强度具有负相关关系,浸泡时间24 h与72 h时抗压强度差幅为37.5%,在该两浸泡时间下浓度增大2 g/L,抗压强度分别平均损耗15.2%、22.5%;塑性混凝土抗压强度受浸泡溶液浓度影响敏感度低于抗拉强度,但受浸泡时间影响比前者更为敏感。

(3)不论物化损伤程度多大,峰值拉伸荷载破坏后的塑性混凝土仍具有一定承拉能力,峰值拉伸变形以低浓度下为最大;溶液浓度增大,混凝土压缩荷载下具有应变硬化特征,抗压性能持续时间较长。

参考文献:

- [1] 官志龙. 基于Abaqus仿真计算的节制闸墩结构安全设计分析研究[J]. 水利科技与经济, 2021, 27(8): 49-54.
- [2] 张娅琴. 两河口水电站泄水出口边坡开挖支护设计研究[J]. 水电站设计, 2021, 37(2): 58-62, 67.
- [3] 岳立宇. 三河口大坝掺纤维混凝土配合比优选研究[J]. 水利建设与管理, 2021, 41(7): 25-30, 38.
- [4] 柴向俐. 新疆北疆地区沥青心墙坝结构设计和稳定分析[J]. 河南水利与南水北调, 2021, 50(4): 62-63.
- [5] 徐俊, 韩文喜, 吴亚东, 等. 粗粒含量对砂泥岩类填料力学性质的影响研究[J]. 水力发电, 2020, 46(12): 117-123.
- [6] 刘璇, 唐新军, 王建祥. 水工沥青混凝土三轴试验的三维细观模拟[J]. 水利与建筑工程学报, 2017, 15(3): 35-39.
- [7] 刘国华, 张宁. 碾压混凝土碾压特性的三维离散元数值模拟[J]. 水电能源科学, 2015, 33(6): 88-92, 104.
- [8] 王俊. 基于微震监测的引汉济渭秦岭隧洞岩爆预测研究[J]. 水利建设与管理, 2019, 39(11): 7-12.
- [9] 宿辉, 马飞, 段宇. 基于声发射技术的高地温隧洞衬砌早龄期混凝土性能试验[J]. 水电能源科学, 2016, 34(3): 117-119.
- [10] 杨庆林. 水利工程石粉改良机制砂混凝土力学性能试验研究[J]. 水利技术监督, 2021(08): 13-15.
- [11] 王显军, 皮崧柏. 单轴压缩下非贯通裂隙岩体力学特性及能量演化机制研究[J]. 甘肃水利水电技术, 2021, 57(5): 26-30.
- [12] 皇民, 赵玉如, 毕洁同, 等. 冻融作用下BFRC轴向拉伸本构模型研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2020(9): 47-51.
- [13] 樊丽辉, 赵庆国, 张君伟, 等. 基于次级键与相平衡的混凝土盐冻破坏理论与试验研究[J]. 河北水利电力学院学报, 2018(4): 7-12.
- [14] 卜祥新. 冻融循环及盐侵蚀复合作用下渠道混凝土耐久性试验研究[J]. 陕西水利, 2018(6): 223-225.
- [15] 赵喜云, 吴建华. 氯盐干湿循环作用下混凝土力学性能与孔结构变化研究[J]. 水利水电技术, 2020, 51(4): 220-226.
- [16] 周志云, 史晓婉, 李强, 等. 除冰盐浓度对混凝土盐冻影响的研究[J]. 水资源与水工程学报, 2012, 23(5): 102-105.