

干湿循环作用下均质土坝坝坡劣化特性研究

马泽锴¹, 叶伟², 徐力群¹

(1. 河海大学 水利水电学院, 江苏 南京 210098;

2. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029)

摘要: 干湿循环过程中, 土体开裂的同时基质吸力会产生较大变化, 此时土体整体稳定性应予以重视。为此, 通过两种比例尺的物理模型试验, 研究坝坡土体的裂缝开展以及基质吸力变化, 分析坝坡稳定状态。研究结果显示: 对于整个坝坡而言, 上游坝坡中部最易产生裂缝, 且该处裂缝最为发育, 同时基质吸力变化幅度最大; 降雨虽然会对坝坡表面裂缝进行修复, 但由于原先产生的干缩裂缝破坏了土体结构, 使得土体结构遭受永久性损伤, 坝坡土压力不再连续, 当裂缝上部土体压力不断增大可能时会出现局部滑坡现象。

关键词: 土石坝; 干湿循环; 裂缝发展; 基质吸力; 坝坡稳定

中图分类号: TV641

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2021)03-0081-05

Deterioration Characteristics of Homogeneous Earth Dam Slope Under Dry Wet Cycles

MA Zekai¹, YE Wei², XU Liqun¹

(1. School of Water Conservancy and Hydropower, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China;

2. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing, Jiangsu 210029, China)

Abstract: During the dry-wet cycle, the soil cracks and matrix suction can change a lot, therefore the overall slope stability should be paid more attention. In this paper, physical model tests in two different scales were carried out to analyze the crack development of the dam slope and the change of the matrix suction, and then the stability of the dam slope was analyzed. The results show that for the whole dam slope, cracks are most likely to occur at the middle part of the upstream dam slope, and cracks are also developed at this area. The matrix suction at the middle part of the dam slope is the largest. In addition, although the cracks are repaired by the rainfall, the integrity of the soil with cracks is not as good as that before the drought. The pressure of the dam slope is no longer continuous and the upper pressure cannot pass to the bottom of the slope. Therefore, local landslides may occur when the upper earth pressure is increasing.

Keywords: embankment dam, dry-wet cycle, crack development, matrix suction, dam slope stability

全球气候变化和变异加大了极端水文气候事件的频次和强度。受其影响, 我国近年气候变化反常、不确定性显著增加, 干旱频发^[1-2]。当前期遭遇极端干旱后随即迎来极端降雨, 会形成旱涝急转极端工况。水库极端低水位和干涸使得坝体产生大范围裂缝, 若随后遭遇强降雨将存在坝坡稳定隐患。一般而言, 旱后的裂缝在随后的降雨过程中最为危

险^[3]。为此, 于婷婷等^[4]考虑降雨作用下的裂缝, 构建拉张裂缝模型, 确定拉张裂缝的位置及深度, 并用剩余推力法计算水库蓄水时边坡的稳定性系数。周志伟^[5]研究发现库水位升降的干湿循环过程中, 红土坝坡呈现出坡顶开裂、上坡面细颗粒迁出、大块土体剥落、坡脚颗粒堆积的上凹下凸的坡面轮廓线变化特征。通常, 裂缝的产生源于土体遭遇干湿循

环,而基质吸力的变化是干湿循环中最为重要的表现,基质吸力的改变影响着土体的抗剪强度,对坝坡稳定有重要影响。目前对干湿循环中吸力变化与强度特征关系的研究有很多,通常采用体积压力板仪实现脱湿和吸湿并制备不同吸力试样,通过直剪试验测试不同吸力下的抗剪强度^[6-7]。研究发现不同类型的土体,基质吸力与抗剪强度的关系也不相同。龚壁卫等^[8]在研究中发现,一般黏性土在脱湿过程中,随着基质吸力的增大,试样的抗剪强度均呈指数函数的趋势增大,而吸湿过程中,吸力较高范围内,抗剪强度随吸力的减小而减低的趋势很明显,而红黏土吸力与抗剪强度的关系还受到土体密度的影响^[9]。对于粉质砂土,含水率逐渐降低时,土体基质吸力对土体抗剪强度的贡献效果并不是一直增加,而是存在一个“峰值效应”^[10]。这类研究一般只侧重于一个干湿循环,而对于土坝、河堤等边坡土体而言,其所处环境复杂,需进行多次反复循环。为此,张芳枝等结合非饱和土三轴试验,通过反复干-湿循环土体与原土体的对比试验,探讨吸力对非饱和黏土体变特性的影响^[11]。

现有研究分析干湿循环对坝坡稳定的影响主要通过直接计算稳定安全系数,或先考虑吸力影响下的抗剪强度再进行分析计算,很少有研究综合考虑干湿循环中裂缝对基质吸力和坝坡土压力的影响,而土压力能直观反映坝坡的受力状态。为此,本文通过小比例尺模型试验准确反映坝坡开裂与基质吸力的变化关系,再通过大比例尺模型试验研究裂缝对坝坡土压力的影响,进而综合分析干湿循环对坝坡稳定的影响。

1 小比尺试验

该模型试验的目的在于获取旱后坝坡基本开裂情况,了解基质吸力与裂缝发展的关系。

1.1 试验模型

试验所用环境箱中装有的长弧氙灯、风机模拟干旱,可调节降雨架模拟降雨天气,试验系统如图 1 所示。试验过程中采用的是 Fredlund FTC-100 热传导传感器量测基质吸力,量测范围是 1 kPa ~ 1 500 kPa,精度优于 5%^[12]。

本文试验土体取自白龟山水库坝坡,土的基本参数见表 1。模型由晾晒后的土壤加水制成与原状土相同的含水率,土样按照白龟山均质土坝以 1:150 的比例制于模型箱中,模型高 25 cm,底部长 130 cm,宽 40 cm,上游面坡比 1:3,下游面坡比 1:2。在

模型的坝脚埋设 1 号传感器,上游坝坡中部为 2 号传感器,坝顶面传感器定于 3 号,坝底部为 4 号传感器,如图 2 所示。

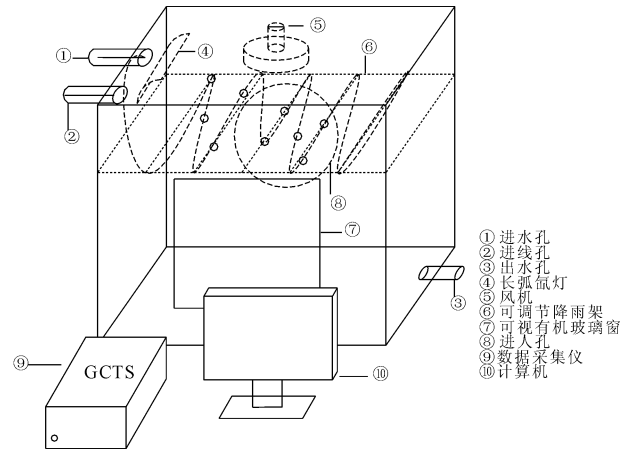


图 1 模型结构示意图

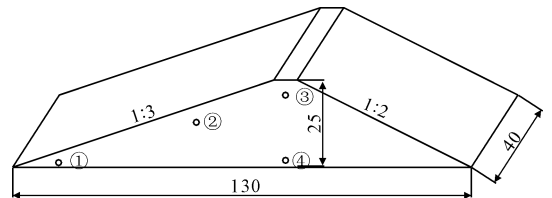


图 2 传感器埋设位置

表 1 土样基本参数表

含水率 $w/\%$	湿密度 ρ $/(g \cdot cm^{-3})$	干密度 ρ_d $/(g \cdot cm^{-3})$	塑性 指数	不均匀 系数	曲率 系数
18.1	1.65	1.40	13.7	17.5	0.914

1.2 试验分析

试验主要进行三次干湿循环,整个环境的控制因素即环境箱中的温度需要保持一定范围,在进行干燥过程时控制在 30℃ 以上即可。

为模拟降雨条件购置了降雨管路,降雨管路上设有直径 2 mm 的小孔,通过调节水压大小,可模拟不同降雨强度,为避免降雨对模型试样本身造成损伤,应该尽量减小降雨的雨滴尺寸,为此,购置可控多头喷雾型降雨管,该降雨管所使用的喷头,喷射出来的雨水呈雾状,不会对模型外观造成明显影响。为了模拟自然环境中的空气流动,环境箱内安装了风机,将风机固定在顶盖上并安装电流调节装置,通过调节电流,可根据需要来设计风速;风、雨、光是模拟实际天气情况的三个重要组成部分,阳光日照模拟设备除提供照射的有效光源外,还可以向试验模型提供热辐射,保证模型箱内温度交替与日常每天的气温相当。因此,选购了能够发射和太阳光波长

相似的长弧疝灯,该长弧疝灯所发射的光谱范围为290 NM~800 NM,可作为模拟太阳光的理想光源。

各次循环中坝坡开裂情况如图3所示。

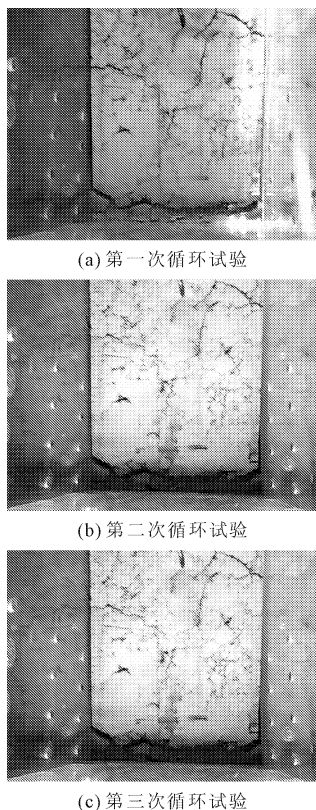


图3 坝坡面裂缝开裂情况

由图3可以看出,干旱过程中裂缝主要出现在坝脚以及坝坡中部,而模型制作中坝脚部位土体直接与模具接触,且该部位土层较薄不能反映实际工程情况,因此只能认为坝坡中部易产生裂缝,而不能断定坝脚处是否是裂缝容易发展区域。

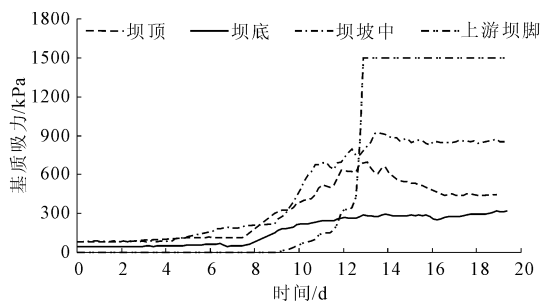
各次循环试验过程中,基质吸力的变化如图4所示。

第一次的循环过程未进行降雨,模型制作完成后即进行干燥试验,其余两次循环均是在上一次干燥完成后进行降雨试验,各次循环的降雨过程中各处的基质吸力均出现骤降。

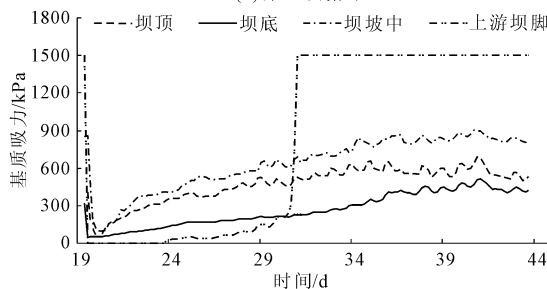
对于各次干湿循环,随着干燥的进行,各部位基质吸力均逐渐增大。在干燥初期,第一次循环中,坝脚处的含水率随蒸发的进行而逐渐降低,但由于地势相对较低,坝坡上部土体内的水会下渗至底部,使得坝脚处含水率降低较慢,因此坝脚基质吸力增长滞后于坝坡中部,后期由于坝脚裂缝贯穿至传感器附近,使得传感器测值达到量程;第二次循环中,经历过降雨的模型整体含水率远大于制作模型时的含

水率,外加干燥过程中坝体其他部位水的入渗,使得坝脚失水比第一次慢了许多,最终导致该部位历时数天才达到极值(传感器量程);第三次循环结果基本与第二次类似。

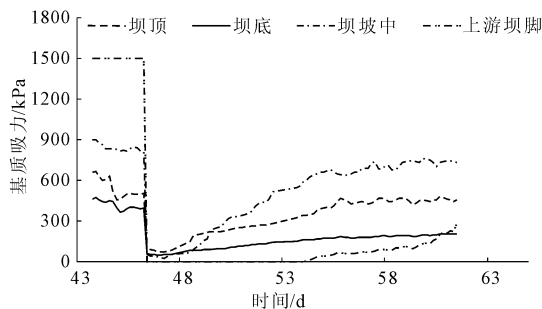
在第一次循环中,坝坡中部最先产生裂缝且更为发育,此处的基质吸力最先快速增长;而由于模型经历过一次干燥,第二次干燥时原先的裂缝会较快形成,从而使得上游坝坡失水较快,基质吸力比第一次更早出现快速增长;第三次循环结果基本与第二次类似。



(a) 第一次循环



(b) 第二次循环



(c) 第三次循环

图4 各部位吸力随时间的变化曲线

由于干燥过程中坝顶出现裂缝,且受环境箱顶部风机影响,干燥冷风经裂缝进入土体,此时的外界温度对基质吸力有较大影响,温度的变化使得基质吸力出现波动,并且当干燥过程进行到十多天之后,坝顶含水率已无太大变化,此时的基质吸力变化主要受温度影响,温度减低,基质吸力增大。

由于坝坡表面裂缝的发展很难影响到坝坡底部,此处的基质吸力在各次干燥过程中增长均较为

缓慢。对应分析图 3 与图 4 发现,在裂缝较为发育处,基质吸力增长相对较快且吸力值较大。

2 大比尺试验

该模型试验的目的在于验证小比例尺模型中受旱坝坡开裂情况(验证小比尺试验中坝坡中部及坝脚开裂情况)以及获取旱后出现裂缝坝坡土体遭遇降雨时的坝坡土压力变化。

试验模型相似性考虑可根据“齐次定理”,把与问题相关的参数表达在同一方程式中,如下:

$$f(L, \rho, g, c, \phi, E, u, \varepsilon, \sigma, \mu, k, t, w, \theta, s, q, p, T, m) = 0 \quad (1)$$

式中: σ 为应力; ε 为应变; u 为位移; T 为温度; w 为风速; t 为时间; p 为侧压力; θ 为体积含水率; q 为降雨强度; s 为吸力; ρ 为密度; c 为黏聚力; ϕ 为内摩擦角; E 为变形模量; μ 为泊松比; k 为渗透系数; L 为尺寸; g 为重力加速度为不变常量。

将各参数按量纲进行分组: $\{\phi, \varepsilon, \mu, \theta, m\}$ 、 $\{L, u\}$ 、 $\{c, E, \sigma, s, p\}$ 、 $\{k, w, q\}$ 。相同量纲量具有相同的相似比,无量纲量相似比等于 1,采用 [FLT] 量纲系统,选取 g, L, ρ 三个量为基本量,由方程可以得到 3 个无量纲 π 项和用 π 项表示的方程为:

$$f(\pi_1, \pi_2, \pi_3) = 0 \quad (2)$$

$$\text{式中: } \pi_1 = \frac{c}{L\rho g}, \pi_2 = \frac{k}{(Lg)^{0.5}}, \pi_3 = \frac{t}{L^{0.5}g^{-0.5}}$$

由于相同量纲的物理量可以用相同的 π 项表示,依据此方法,按量纲的异同以及因变量、自变量 π 的取舍要求,将其重新整理列出:

$$\begin{aligned} \pi_1 &= \frac{\sigma}{L\rho g}, \pi_2 = \frac{u}{L}, \pi_3 = \frac{t}{L^{0.5}g^{-0.5}}, \pi_4 = \frac{k}{(Lg)^{0.5}}, \\ \pi_5 &= \frac{c}{L\rho g}, \pi_6 = \frac{w}{(Lg)^{0.5}}, \pi_7 = \frac{p}{L\rho g}, \pi_8 = \frac{q}{(Lg)^{0.5}}, \\ \pi_9 &= \frac{c}{L\rho g}, \pi_{10} = \frac{s}{L\rho g} \end{aligned} \quad (3)$$

由于无量纲量的相似比为 1,则有: $C_\phi = C_\mu = C_\varepsilon = C_\theta = C_m = 1$,根据推导出的相似准则,设 $C_\rho = C_g = 1$,则可以得到各参数的相似比为:

$$\begin{aligned} C_L &= C_c = C_E = C_\sigma = C_u = C_p = C_s = n, \\ C_k &= C_t = C_q = n^{0.5} \end{aligned} \quad (4)$$

2.1 试验模型

试验所用土体与小比例尺试验相同,模型按 1:28 制作,模型各部位尺寸及土压力计埋设如图 5 所示。试验共用土压力计 3 只,分别位于坝坡底部、

中部与上部。试验中渗压计与降雨流量计均连接至自动化数据采集系统。试验在自制的环境箱中进行(如图 6 所示),该试验系统可进行干旱及降雨模拟。

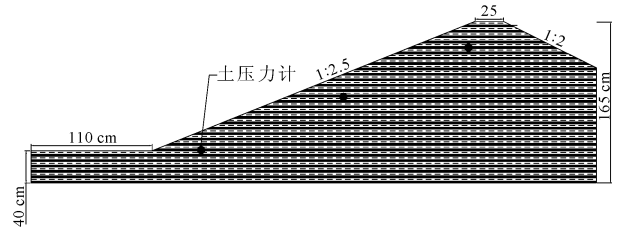
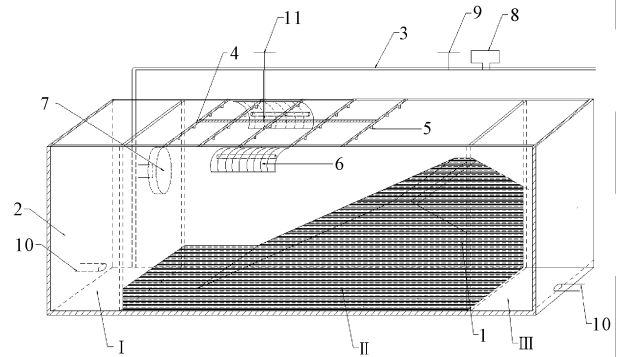


图 5 模型示意图



1 - 模型坝体; 2 - 钢化玻璃外罩; 3 - 输水管; 4 - 降雨管路; 5 - 降雨喷头; 6 - 长弧氙灯; 7 - 风机; 8 - 增压泵; 9 - 流量计; 10 - 排水孔; 11 - 降雨注水阀门

图 6 试验系统

2.2 试验分析

试验过程分为 3 步,分别为初期蓄水、模拟干旱以及降雨蓄水。

进行第一步试验时先将坝前水位蓄至与实际工程对应的校核水位 1.2 m,保持水位不变约 40 h,随后将坝前蓄水抽出进行干旱模拟。干旱时打开长弧氙灯与风机,保持环境箱内温度不低于 30℃,待坝坡裂缝发展基本稳定后停止,干旱时长约为 350 h。第三步进行人工降雨,使坝前水位逐渐上升,观察各时段土压力计数值变化。

第一阶段土压力变化如图 7 所示,斜墙上部在蓄水初期水位未上升至该部位,土体含水率未发生较大变化,使得传感器上部土重未变化,土压力值基本维持在一个稳定值;斜墙中部在蓄水过程后,下部细砂料出现了湿陷现象,导致坝坡中部出现不均匀沉降缝,因此中部的土压力值发生很大变化;斜墙下部填料均为黏土,砂土湿陷对此处土压力值影响很小,蓄水过程中传感器上覆土重增大,蓄水过后随后土体内的水流出,土体自重减小,土压力随之减小。

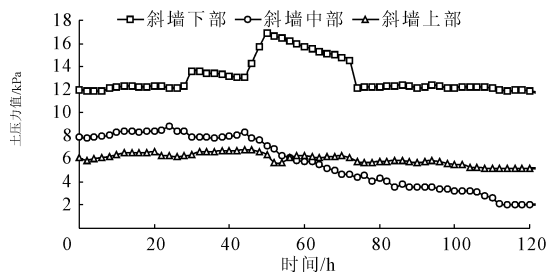


图7 第一阶段土压力变化

第二阶段土体裂缝发展及土压力变化如图8—图9所示,对比小比例尺模型试验干燥过程中裂缝开展情况,可以发现:坝坡中部依旧存在较多裂缝,而坝坡与铺盖连接段(坝脚处)的裂缝相对较少,因此可以认为坝坡中部为裂缝最易发展区域。试验发现,与初次蓄水时相比,各处土压力值基本稳定,随着干燥过程的进行,坝坡中部土压力计有少许增长,进行到干燥后期,由于坝体水分的不断蒸发,传感器上覆土重减小,土压力越来越小。受旱一段时间后,试验人员在坝顶走动进行坝体含水率量测,坝坡上部土压力计测值出现了增长波动,随后缓慢降低,而此时的中部土压力未出现变化,表明裂缝发展后,上部的结构土压力已不能向下部传递。

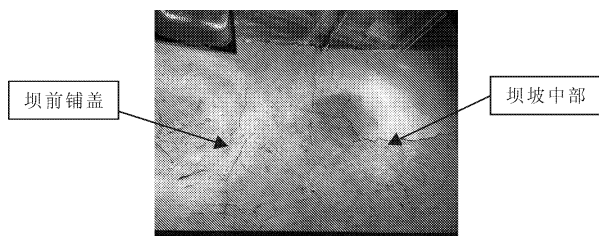


图8 裂缝发展

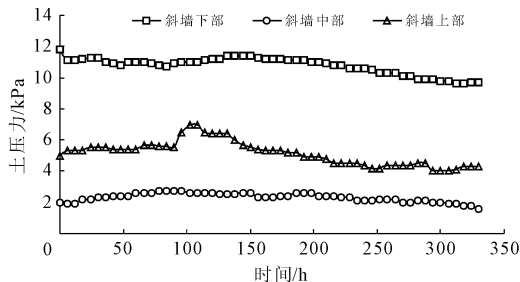


图9 第二阶段土压力变化

从图10可以看出,经历过降雨蓄水后坝坡各处土压力均有不同程度的增大,斜墙中部由于原先裂缝较发育,使得埋设土压力计的部位存在卸荷现象,降雨虽然会对坝坡表面裂缝进行修复,但由于原先产生的干缩裂缝破坏了土体结构,使得土体结构遭受永久性损伤,坝坡土压力不再连续,当裂缝上部土

体压力不断增大可能时会出现局部滑坡现象。

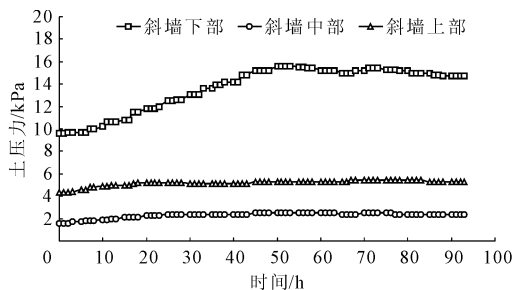


图10 第三阶段土压力变化

比较试验四个阶段的土压力大小(如表2所示),发现在模型填筑完成时,由于各处都进行了碾压,土压力均比较大,初次蓄水后水的入渗使得砂土产生湿陷,土压力均有所减小,其中斜墙中部由于产生了沉降缝,土压力减小幅度较大,经历过干旱后各处土体含水率减小,土压力也随之减小,随后的降雨蓄水过程又使得含水率增大,土压力也随之增大。

表2 三个不同部位土压力大小

部位	土压力/kPa			
	初次蓄水前	初次蓄水后	干旱后	降雨蓄水后
斜墙底部	12.1	11.8	9.6	14.3
斜墙中部	7.9	2.1	1.6	2.4
斜墙上部	6.1	5.1	4.3	5.3

3 结论

基于两种比例尺物理模型试验,研究了干湿循环过程中坝坡裂缝开裂、基质吸力及土压力变化情况,研究发现:

(1) 对于均质土坝而言,上游坝坡中部为裂缝最易发展区域,其次为坝脚区域。整个干湿循环过程中各部位的基质吸力变化差异较大,裂缝的出现使得基质吸力变化幅度更大,而基质吸力的变化反应土体抗剪强度以及渗透系数的改变,因此裂缝的开展使得土体的性质波动较大,值得实际工程关注。

(2) 对于存在裂缝的坝坡中部,土压力值比坝坡上部更小,坝坡中部的裂缝使得坝坡土体不再连贯,当遭遇降雨时,上部土体逐渐饱和使得上部土重增加,此时易发生局部滑坡危险。虽然裂缝在降雨后会出现一定程度的愈合,但内部土体连贯性无法恢复至裂缝前,再一次的受旱过程会使原先的裂缝快速出现,严重影响坝坡稳定。

(下转第130页)

制砂混凝土抗压强度的预测模型。主要结论如下:

(1) 水胶比对抗压性能的影响最大;随着水胶比、钢渣掺量和粉煤灰掺量的增大,其不同龄期混凝土抗压强度逐渐降低。

(2) 随着砂率的增大,其不同龄期混凝土抗压强度升高;随着机制砂掺量的增大,混凝土抗压强度呈现先增长后降低的趋势,存在最优掺入量。

(3) 建立的预测模型精度较高,能够反映各因素对混凝土抗压强度的影响。

参考文献:

- [1] 刘世星. 不同外掺料对机制砂混凝土强度及和易性影响分析[J]. 新型建筑材料, 2019, 46(8): 86-88.
- [2] 徐鑫, 夏京亮, 周永祥, 等. 机制砂 T 梁 C55 混凝土配制及性能研究[J]. 混凝土, 2019, 354(4): 139-142.
- [3] 宁成晋. 高强高性能机制砂混凝土关键技术研究[D]. 广州: 广州大学, 2016.
- [4] 张敏, 楼康年, 元成方, 等. 材料因素对机制砂混凝土孔隙结构的影响[J]. 混凝土, 2018, 34(2): 69-72.
- [5] 黄炜. 机制砂混凝土的配比设计及应用研究[J]. 工程技术研究, 2018(13): 82-84.
- [6] 吴小锋, 黄小玲. 正交试验法在混凝土配合比设计中

的应用[J]. 广东建材, 2016, 32(7): 6-8.

- [7] 郭维媛. 石粉含量对 C55 机制砂混凝土性能的影响[J]. 山西建筑, 2018, 44(34): 109-110.
- [8] 程小栓, 黄慧君. 机制砂石粉含量对混凝土工作性能的影响[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2019, 15(2): 80-81.
- [9] 田进. 钢渣在混凝土中的应用研究[D]. 武汉: 湖北大学, 2016.
- [10] 张亚曼, 辛公锋, 张爱勤. 钢渣在混凝土中的应用研究进展[J]. 山东交通科技, 2016(3): 18-21.
- [11] 施忠旗, 马世斌, 周丰, 等. 石灰岩石粉掺量对机制砂混凝土早龄期热膨胀系数的影响[J]. 福建建材, 2019(8): 1-3.
- [12] 沈恒祥, 孔云, 庞建勇. 基于正交试验和灰色系统理论的混杂纤维混凝土抗压强度的研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2020, 18(3): 54-58.
- [13] 孙胜伟. 石粉含量对 C30 和 C50 机制砂混凝土性能的影响[J]. 水利与建筑工程学报, 2019, 17(3): 160-163.
- [14] 谢开仲, 刘振威, 盖炳州, 等. 不同岩性的机制砂混凝土本构关系及力学性能[J]. 建筑科学与工程学报, 2021, 38(1): 99-106.

(上接第 85 页)

参考文献:

- [1] 张建业, 王国庆. 气候变化与水库大坝安全[J]. 中国水利, 2008(20): 17-19, 9.
- [2] 张建业, 王国庆, 刘九夫, 等. 国内外关于气候变化对水的影响的研究进展[J]. 人民长江, 2009, 40(8): 39-41.
- [3] 蒋泽锋, 朱大勇. 强降雨条件下具有张裂缝边坡临界滑动场[J]. 岩土力学, 2016, 37(S2): 25-34.
- [4] 于婷婷, 顾圣平, 邵雪杰, 等. 考虑降雨拉张裂缝作用的库岸边坡稳定性分析[J]. 人民黄河, 2017, 39(4): 104-107.
- [5] 周志伟. 干湿循环下红土模型坝坡劣化特性研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2017.
- [6] 陈正汉. 非饱和土与特殊土测试技术新进展[C]//全国非饱和土学术研讨会. 2005.
- [7] 张芳枝, 陈晓平. 非饱和黏土变形和强度特性试验研

究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(S2): 3808-3814.

- [8] 龚壁卫, 周小文, 周武华. 干-湿循环过程中吸力与强度关系研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(2): 207-209.
- [9] 刘星志, 陈铭, 陈小燕, 等. 基质吸力在不同干密度下对非饱和红土抗剪强度的影响[J]. 中国农村水利水电, 2017(3): 126-130.
- [10] 董倩, 侯龙, 赵宝云. 基质吸力对非饱和粉质砂土抗剪强度的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012, 43(10): 4017-4021.
- [11] 张芳枝, 陈晓平. 反复干湿循环对非饱和土的力学特性影响研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(1): 41-46.
- [12] 叶伟, 马福恒, 胡江, 等. 旱涝急转下斜墙坝渗流特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(10): 1923-1929.