

文章编号:0559-9350(2020)08-0915-09

冻融过程对膨胀土渠道边坡劣化模式的影响

蔡正银¹, 朱锐^{1,2}, 黄英豪¹, 张晨¹, 郭万里¹, 陈皓¹

(1. 南京水利科学研究院 岩土工程研究所, 江苏 南京 210024; 2. 河海大学 土木与交通学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 干湿作用和冻融作用是季冻土地区复杂环境的两种基本形式, 深刻影响着输水渠道的长期稳定性。以北疆膨胀土渠道边坡为研究对象, 开展了湿干循环及湿干冻融耦合循环作用下膨胀土渠道边坡劣化过程离心模型试验, 探讨了湿干冻融耦合循环作用中的冻融过程对膨胀土渠道边坡劣化模式的影响。试验结果表明: 湿干循环作用下膨胀土渠道边坡的劣化模式主要为浅层土体强度衰减和表面裂隙发育, 同时伴随着显著的土体崩解剥落特征; 湿干冻融耦合循环作用下膨胀土渠道边坡劣化过程中则未出现明显的土体崩解剥落现象, 主要劣化模式为渠顶区域土体裂隙拓展、连通; 湿干冻融耦合循环作用中的冻融过程使得渠顶处的渠水入渗量大幅增长, 造成渠顶土体的干湿循环幅度增大, 诱使膨胀土渠道边坡的劣化过程由浅层土体往深层土体发展, 在宏观上表现为渠顶及渠坡水位线以上区域内裂隙的连通程度增高、拓展宽度及深度增大, 并最终发展为贯穿渠顶的横向张拉裂隙。膨胀土渠道边坡在湿干冻融耦合循环作用下有着自贯穿渠顶的横向裂隙发生失稳破坏的趋势。

关键词: 湿干冻融; 湿干循环; 膨胀土; 渠道边坡; 裂隙; 离心模型试验

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

doi: 10.13243/j.cnki.slxb.20200064

1 研究背景

干湿循环作用和冻融循环作用的本质都是由于水分的迁移或形态变化简化而得的边界条件。基于此, 大量的试验研究、数值模拟研究和理论研究对干湿或冻融循环作用下的边坡劣化失稳机理进行了深入的探索^[1-3]。由于应力状态和时间跨度方面均具有更好的相似性, 离心模拟技术被广泛地应用于岩土工程问题的研究中^[4-5]。陈生水等^[6-7]通过离心模型试验对干湿循环作用下的膨胀土边坡变形发展过程进行了探索, 认为膨胀土渠道边坡的劣化失稳具有浅层性和渐进性的特点; 陈皓等^[8-9]开展了考虑干湿循环作用的膨胀土渠道边坡破坏机制离心模型试验研究, 提出了浅层崩解剥落式的失稳破坏形式。对于干湿循环作用下的膨胀土边坡劣化失稳机理, 基本形成了统一认识, 即干湿循环作用对膨胀土的裂隙发育和强度衰减有着促进作用, 并由此削弱了膨胀土渠道边坡的稳定性。对于冻融循环作用下的边坡劣化失稳机理, 受限于冻土离心模拟技术发展缓慢, 仅有少数学者做了探索^[10-11], 张晨等^[12]通过自主研发的渠道冻胀离心模拟设备开展了冻融循环作用下的渠道边坡劣化研究, 认为在无外界水源补给的闭场系统中, 冻融循环作用导致的渠基土冻胀融沉变形量较小; 唐少容等^[13]开展了考虑冻融循环作用的U形衬砌渠道边坡冻胀特性离心模型试验, 认为渠道在持续的低温环境中未发生明显的破坏, 渠底和渠坡位置产生了显著的冻胀变形。

然而, 渠道现场并非单一的闭场系统, 而是复杂的多物理场耦合系统。以北疆季节性供水渠道

收稿日期: 2020-02-12; 网络首发时间: 2020-08-15

网络首发地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1882.TV.20200814.0937.002.html>

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0405100); 国家自然科学基金项目(51709185, 51879166, 51909170); 中央级公益性科研院所基金基本科研业务费项目(Y319010); 中国博士后科学基金(2018M640500)

作者简介: 蔡正银(1965-), 教授级高级工程师, 主要从事土的基本性质与土工测试、土的本构理论、土工离心模拟技术研究。

E-mail: zyc@nhri.com

通讯作者: 朱锐(1992-), 博士生, 主要从事环境岩土研究。E-mail: yzzhurui@163.com



图1 北疆渠道劣化失稳图

为例, 渠道一般在4月通水、9月停水, 此外该渠道处于高纬度季节性冻土地区, 渠道现场冬季最低温度和夏季最高温度分别达到 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。从水分和温度变化的角度出发, 该渠道每年经历反复的湿干交替过程和冻融循环过程^[14]。通水近20年的北疆季冻区输水渠道已经证实, 干湿和冻融之间的相互影响和耦合循环作用会造成膨胀土渠道更加严重的劣化破坏, 如图1所示。对此, 蔡正银等提出了湿干冻融耦合循环边界条件(下文简称耦合循环), 对耦合循环作用下膨胀土的劣化机理进行了探索^[15-16], 但对于耦合循环作用和湿干循环作用下膨胀土渠道边坡劣化模式的异同, 即耦合循环作用中的冻融过程对膨胀土渠道边坡劣化模式的影响尚未得出明确结论。

鉴于此, 通过模拟现场干湿交替、冻融循环的复杂多物理场环境, 拟开展膨胀土渠道边坡在湿干循环(WD)以及耦合循环作用(WDFT)下的离心模型试验, 描述湿干循环及耦合循环作用下膨胀土渠道边坡的劣化过程, 对耦合循环作用中的冻融过程对膨胀土渠道边坡劣化模式的影响作进一步探讨。

2 冻土离心模型试验相似比尺

相似比尺是进行冻土离心模型试验研究的理论依据^[8]。Miller^[17]最早对冻土离心模型试验的相似比尺进行了研究, 认为适用于“刚性冰”模型中土体应力(孔隙冰压力、有效应力等)的相似比尺(原型/模型)为1。Savidou等则对土工离心模型试验中的热扩散效应进行了研究, 诸多学者基于此开展了离心模型试验并对热扩散效应的相似比尺进行了验证^[18-19]。但是冻土作为一种多相介质, 颗粒间孔隙水相变引起的土体变形是多场耦合作用的结果, 故以充分考虑水-热耦合作用的相似比尺为依据的冻土离心模型试验才能更为准确地反映寒区膨胀土渠道的冻融作用特征。鉴于此, 试验比尺参考文献[19]以及张晨等^[20]基于Butterfield量纲分析法建立的一系列冻土离心模型试验相似比尺, 如表1所示。

3 试验方案及试验方法

3.1 试验方案 试验以北疆膨胀土渠道边坡为研究对象, 2组湿干循环作用下的离心模型试验 $1_{\text{WD}}^{\#}$ 、 $2_{\text{WD}}^{\#}$ 和2组耦合循环作用下的离心模型试验 $1_{\text{WDFT}}^{\#}$ 、 $2_{\text{WDFT}}^{\#}$ 分别在南京水利科学研究院中型($60\text{ g}\cdot\text{t}$)和大型($400\text{ g}\cdot\text{t}$)土工离心机上进行, 如图2所示。其中, 中型土工离心机上安装有自制的湿干循环模

表1 试验相似率(原型/模型)

物理量	相似率	物理量	相似率
加速度	1/N	热扩散系数	1
颗粒尺寸	1	导热系数	1
密度	1	冻胀量	N
应力	1	时间(未冻水迁移)	N ²
温度	1	时间(融土固结)	N ²
位移	1	时间(热交换)	N ²

拟装置, 主要由水箱、电子阀、卤素灯、试验控制系统等组成, 可用于湿干循环作用下渠道稳定性的离心模型试验研究; 大型土工离心机安装有自主研发的季冻区渠道湿干冻融离心模型试验设备, 主要由干湿系统、热交换系统、试验模型箱、地面冷却水循环装置、试验控制系统等组成, 可精准控制超重力场下模型渠道的水位升降过程、干燥过程、温度(-40℃~30℃)变化过程, 试验1[#]_{WDFT}、2[#]_{WDFT}即通过该设备在离心场下模拟了渠道经历湿润-干燥-冻结-融化作用的过程。四组试验用土均取自北疆渠道现场, 且具有区域代表性, 分别为弱~中等胀缩性的青色膨胀土和中~强胀缩性的黄色膨胀土, 其土体参数如表2所示。

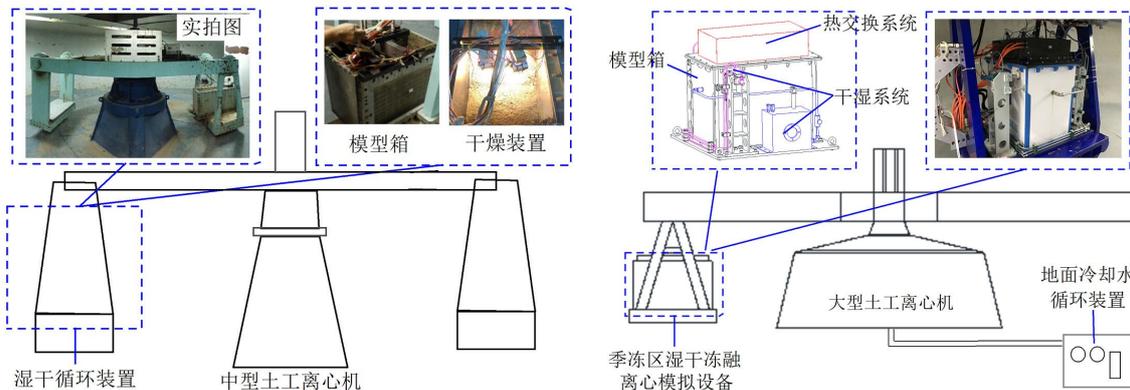


图2 试验设备

表2 土样基本性质

参数名称	1 [#] _{WD}	2 [#] _{WD}	1 [#] _{WDFT}	2 [#] _{WDFT}
土名	青色膨胀土	黄色膨胀土	青色膨胀土	黄色膨胀土
比重	2.67	2.66	2.66	2.67
液限/%	61.3	57.1	47.2	52.6
塑限/%	20.1	17.6	16.8	18.4
塑性指数	41.2	39.5	30.4	34.2
自由膨胀率/%	74.0	90.0	52.0	71.0
砂粒/%	27.8	32.5	42.5	29.9
粉粒/%	42.1	36.5	32.5	38.6
黏粒/%	30.1	32.5	25.0	31.5

北疆膨胀土渠道边坡断面为梯形, 渠高约为5m, 渠水深度约为4m, 两边渠坡坡比均为1:2。考虑到渠坡断面的对称性, 四组试验均取现场渠道边坡断面的一半进行模拟。4组试验均进行3次循环作用, 其中, 1[#]_{WD}、2[#]_{WD}进行3次湿干循环作用, 1[#]_{WDFT}、2[#]_{WDFT}进行3次耦合循环作用。试验设计离心加速度均为50g, 进行缩尺计算后模型渠道的具体断面尺寸如图3所示。模型制作时首先按设定含水率和干密度配土分层击实, 再按设计尺寸进行开挖和削坡。其中, 4组试验模型土体干密度均为1.6g/cm³, 1[#]_{WD}、2[#]_{WD}和1[#]_{WDFT}、2[#]_{WDFT}的模型土体初始含水率分别为18.8%和18.4%。

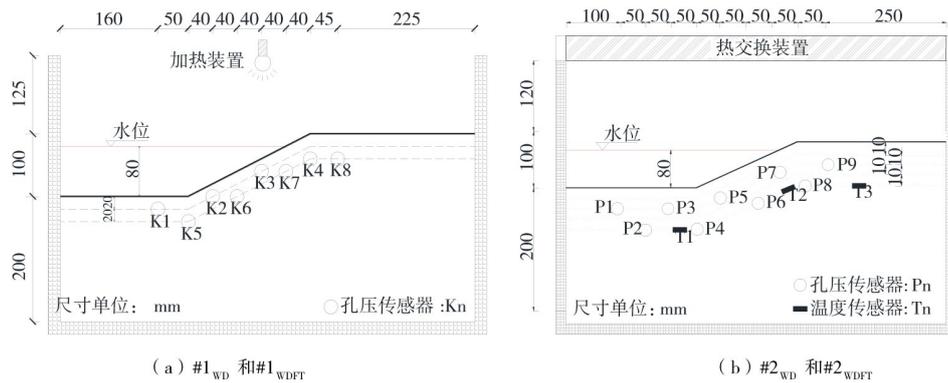


图3 模型尺寸和传感器布置

为便于进行对比分析，仅选取4组试验中均测量或捕捉的特征进行描述，即湿润过程中渠基土的孔隙水压力和模型渠道表面裂隙劣化特征。其中，采用的孔隙水压力传感器相同，尺寸为 $\phi 13 \times 12.5$ mm，量程为0~100 kPa，精度 ± 0.01 kPa。传感器的具体布置方式如图3所示。

3.2 试验方法 基于湿干循环^[8-9]和湿干冻融耦合循环^[15-16]简化边界条件分别进行换算，湿干循环和耦合循环的试验方法和试验步骤如图4所示。其中，在 $1^{\#}_{WD}$ 、 $2^{\#}_{WD}$ 中，在1g条件下注水至预定水位线处后再将离心机加速度从1g升至50g，以模拟湿润过程；渠水排尽后通过模型箱顶部的卤素灯光照射模型渠道，配合离心机自转产生的强迫对流来对模型渠道进行干燥。在 $1^{\#}_{WDFT}$ 、 $2^{\#}_{WDFT}$ 中，通过离心机载水位升降装置在不停机的情况下模拟渠道湿润过程；随后打开通风口，以离心机高速运转产生的风力吹过模型渠道上方模拟渠道现场风干过程；通过远程设定半导体热交换装置的温度输出，分别自上而下的对模型渠道进行制冷/制热(图3(b))(机室环境温度约为32℃)，以模拟现场渠道的冻结和融化过程。渠道冻结过程的终止标准为达到现场渠道最大冻深2m(对应至离心模型试验中为模型渠道法向深度40mm)，融化过程的终止标准为冻结土体全部融化，判断标准基于模型渠道法向深度40mm测点处的温度变化情况，即低于或高于0℃。从上述试验方法可以看出，相较于 $1^{\#}_{WD}$ 、 $2^{\#}_{WD}$ ， $1^{\#}_{WDFT}$ 、 $2^{\#}_{WDFT}$ 不仅在简化边界条件上更为贴切现场复杂气候条件，在模拟方式上也更为迎合现场渠道实际情况。

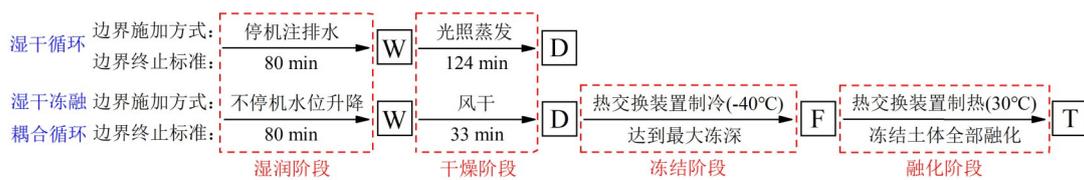


图4 试验方法和步骤

4 试验结果与分析

4.1 冻融过程对渠水入渗的影响 为更好地表征渠水入渗程度，引入无量纲参数 D ，定义为实测孔压传感器读数^[8-9]与对应位置静水压力计算的比值， D 愈高即代表渠水入渗愈充分，当 D 为1时，表明该测点处渠基土已饱和。

图5为不同循环次数下各测点处 D 的变化曲线。可以发现随着湿干循环或耦合循环次数的增长，四组试验中 D 的变化规律相似，均呈不断上升的趋势。在同一组试验中，不同循环次数后 D 的波动差别较大。这是因为在第一次循环过程中，土体初始饱和度较低，渠水入渗较为显著进而导致孔隙水压力消散，实测孔压传感器读数较低且波动幅度较大；在第二次、第三次循环过程中，入渗行为趋于稳定， D 的波动差别随之明显降低。沿模型渠道断面长度方向来看， D 在模型渠底、渠坡、渠顶的

数值逐步减小，表明渠水入渗不断深入，且模型渠底的渠水入渗最为充分($D \approx 1$ ，饱和状态)、渠坡次之(D 为0.85~1，接近饱和状态)，渠顶入渗程度最低(D 为0.6~0.95，非饱和状态)。对比三次湿干循环和耦合循环作用过程中模型渠道的渠水入渗程度， $1_{\text{WDFT}}^{\#}$ 、 $2_{\text{WDFT}}^{\#}$ 中渠底、渠坡、渠顶处 D 的平均值均高于 $1_{\text{WD}}^{\#}$ 、 $2_{\text{WD}}^{\#}$ ，这说明耦合循环作用中的冻融过程使得渠水入渗进一步地深入，宏观表现为渠水入渗量的增加。

将三次耦合循环后与湿干循环后 D 的均值绘制于图6中。从图6(a)中可以发现，在渠底、渠坡、渠顶处， $1_{\text{WDFT}}^{\#}$ 和 $2_{\text{WDFT}}^{\#}$ 中的 D 值均高于 $1_{\text{WD}}^{\#}$ 、 $2_{\text{WD}}^{\#}$ ，且相较于 $1_{\text{WD}}^{\#}$ 、 $2_{\text{WD}}^{\#}$ 分别增长约了1%、1%、27%和0.2%、4%、8%，表明耦合循环作用中的冻融过程使得渠顶处的渠水入渗量大幅增长，造成渠顶土体的干湿循环幅度增大，进而诱发渠顶土体的进一步劣化。考虑到试验 $1_{\text{WD}}^{\#}$ 、 $2_{\text{WD}}^{\#}$ 中所用土料未剔除部分砂砾石杂质，渗透系数应略大于试验 $1_{\text{WDFT}}^{\#}$ 、 $2_{\text{WDFT}}^{\#}$ 中所用土料，可以认为计算得到的渠水入渗增量是较为保守的。另外，从图6(b)中可以看出， $2_{\text{WD}}^{\#}$ 中的 D 值在渠顶处高出 $1_{\text{WD}}^{\#}$ 约16%，而 $1_{\text{WDFT}}^{\#}$ 和 $2_{\text{WDFT}}^{\#}$ 中的 D 值则近似相等，表明湿干循环作用下土体膨胀性较强的模型渠道渠水入渗更为显著，耦合循环作用下土体膨胀性对于模型渠道中渠水入渗行为的影响较小。

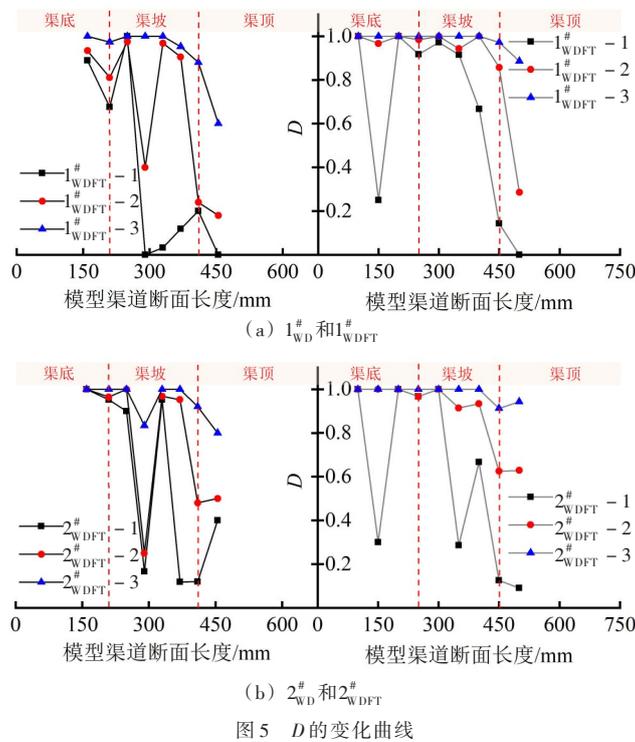


图5 D 的变化曲线

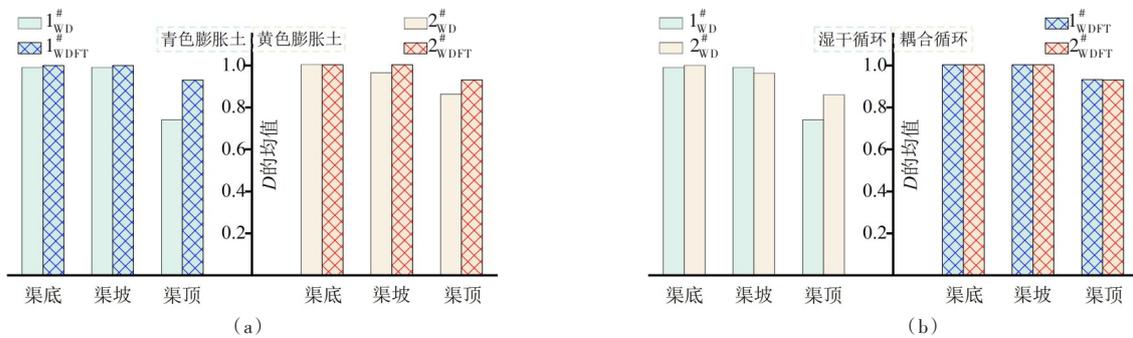


图6 D 的平均值

4.2 冻融过程对模型渠道劣化特征的影响 在离心场下经过三次湿干循环或耦合循环作用后，4组试验中模型渠道均出现显著的劣化特征，如图7所示。可以发现，无论是经历湿干循环作用还是耦合

循环作用，模型渠道表面均出现了大量不规则的张拉裂隙， $1_{WD}^{\#}$ 、 $2_{WD}^{\#}$ 中这些不规则的张拉裂隙较为细小、分散，而 $1_{WDFT}^{\#}$ 、 $2_{WDFT}^{\#}$ 中则呈现联络、集中的特征。从单元体角度来分析，可以认为单元土体由于失水收缩产生拉应力，进而产生拉应变，并最终会产生一个应变集中点，诱发了张拉裂隙的产生，裂隙的拓展会导致裂隙周围先前的拉应变得到释放，裂隙的拓展也因单元土体应力场的重分布而放缓^[21]。模型渠道边坡可以看做若干个单元土体组成，故在湿干循环作用下， $1_{WD}^{\#}$ 、 $2_{WD}^{\#}$ 中产生了大量细小、分散的张拉裂隙。在 $1_{WDFT}^{\#}$ 、 $2_{WDFT}^{\#}$ 中，冻结过程使得渠基土中的孔隙水产生了相变。在热-水-力耦合作用下，重分布后的单元土体应力场受冻胀变形的影响产生了变化。由于干燥失水后的浅层渠基土饱和度较低，在低温环境下渠基土中的水分迁移过程并不显著。而水分迁移通量越低，低温条件下岩土体中的冻胀力越大，此时非平直裂隙壁面以压应力为主，裂隙尖端则以拉、剪应力为主，造成裂隙尖端产生拉应力集中和剪应力集中^[22-23]，分别导致已产生的裂隙进一步拓展和偏转行为的发生。当温度场再次产生变化(融化过程)时，渠基土的应力场再次产生变化，一次完整的冻融过程使得干湿阶段产生的裂隙进一步地拓展、连通，同时还发生了破碎、断裂行为^[15-16]。综上所述，可以认为耦合循环作用中的冻融过程显著加剧了渠顶及渠坡水位线以上区域中裂隙的进一步拓展，诱发的裂隙再次发育在宏观上表现为裂隙的连通程度增高。

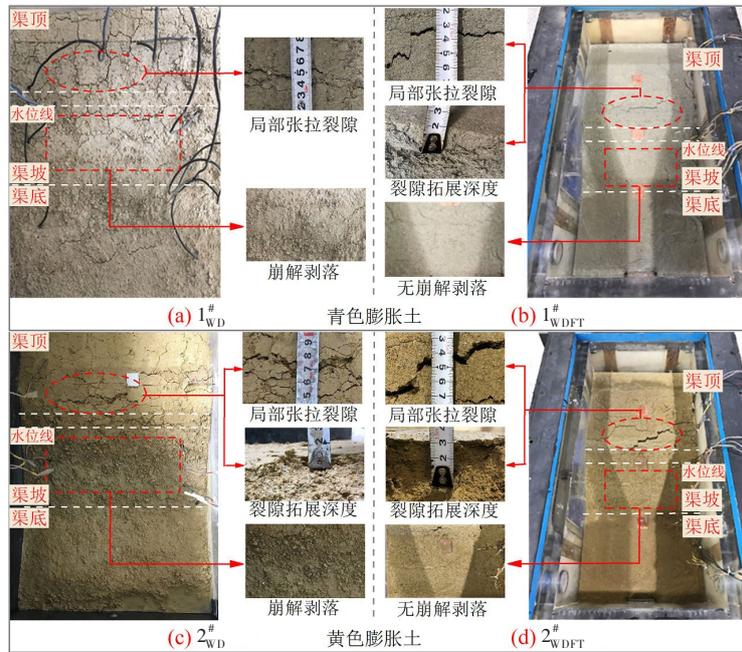


图7 模型渠道劣化特征

此外，4组试验中渠坡与渠顶的交界处均出现了一条贯穿渠顶表面的横向裂隙，选取该裂隙进行定量分析，结果如表3所示。可见， $1_{WDFT}^{\#}$ 的最大张拉裂隙宽度高于 $1_{WD}^{\#}$ ，较 $1_{WD}^{\#}$ 约增加了20%， $2_{WDFT}^{\#}$ 的最大张拉裂隙宽度和拓展深度均显著高于 $2_{WD}^{\#}$ ，较 $2_{WD}^{\#}$ 分别增加了约96%、220%。可以认为，在渠顶裂隙拓展过程中，耦合循环作用中的冻融过程显著增大了渠顶裂隙宽度和裂隙深度，这也与上文所述渠顶处渠水入渗量显著增加相对应。此外，土体膨胀性强弱对于裂隙发育也有一定的影响， $2_{WD}^{\#}$ 的最大张拉裂隙宽度较 $1_{WD}^{\#}$ 增加了12%左右， $2_{WDFT}^{\#}$ 的最大张拉裂隙宽度和拓展深度较 $1_{WDFT}^{\#}$ 分别增加了83%和45%左右。无论是在湿干循环还是耦合循环作用下，相较于弱~中等胀缩性的青色膨胀土模型渠道，中~强胀缩性的黄色膨胀土模型渠道中裂隙拓展行为均更为明显。前已述及，冻融过程对单元土体裂隙拓展有着明显的促进作用^[15]，而渠顶与渠坡交界处后缘张拉裂隙的进一步拓展发育除了上述作用外，还应从渠道边坡整体变形角度来考虑， $1_{WDFT}^{\#}$ 、 $2_{WDFT}^{\#}$ 中模型在离心力作用下模拟了现场渠道的应力状态，故在渠基土融化过程中，模型渠道边坡整体产生了竖直方向的固结压密，

表3 最大张拉裂隙定量参数

裂隙参数	1 [#] _{WD}	2 [#] _{WD}	1 [#] _{WDFT}	2 [#] _{WDFT}
宽度/mm	2.5	2.8	3.0	5.5
深度/mm		10	22	32

注：1[#]_{WD}中进行裂隙深度测量时，最大张拉裂隙受损，故未给出裂隙拓展深度劣化特征图及测量数据。

且渠坡及渠顶产生了水平方向位移^[24]，进而引发渠基土应力路径偏转，导致渠顶与渠坡处的后缘张拉裂隙进一步拓展，并最终发展为贯穿渠顶的横向张拉裂隙。

从图7中还可以发现，1[#]_{WD}、2[#]_{WD}中渠坡水位线以下区域出现了显著的崩解剥落现象，而1[#]_{WDFT}、2[#]_{WDFT}中则未观察到这一现象。对此现象进行分析，归纳总结了以下三个原因：(1)从崩解剥落机理的角度来看，模型渠坡产生崩解剥落现象主要是由于湿干过程造成土体失水收缩，渠坡表面裂隙迅速拓展，裂隙数量和裂隙密度急剧增加，进而诱发模型渠坡浅层土体崩解剥落，但在耦合循环过程中，冻融过程使得渠坡浅层土体内部裂隙破碎断裂，以微细观角度来看可视为土体颗粒或团聚体的破碎及重组^[15]，这些土体颗粒在融化过程中由于融水的湿化作用和离心力作用而产生上述固结压密行为^[24-25]，使得破碎断裂后的微细、分散的裂隙产生闭合的趋势，故1[#]_{WDFT}、2[#]_{WDFT}中渠坡表面水位线以下区域均未出现明显的崩解剥落现象。而对于渠坡水位线以上部分渠基土，由于渠坡的变形反而导致后缘张拉裂隙进一步地拓展发育。(2)1[#]_{WD}、2[#]_{WD}未考虑冻融过程，干湿过程仅按照全年通停水时间进行缩尺，因此4组试验的湿润时间完全一致，均为80 min，而1[#]_{WD}、2[#]_{WD}的干燥时间124 min则显著长于1[#]_{WDFT}、2[#]_{WDFT}中的干燥时间33 min，故干燥幅度更大，从而更易出现崩解剥落现象；(3)取自渠道现场的试验土样含有较多砂砾石等杂质，1[#]_{WDFT}、2[#]_{WDFT}为探究试验现场真实边界条件下膨胀土渠道边坡的劣化机理，故试验土样挑出所有杂质后进行碾压筛分，而1[#]_{WD}、2[#]_{WD}为模拟现场真实渠基土，试验土样中含有部分杂质^[9]，导致两组试验土样的颗粒级配和组成有一定差异，1[#]_{WD}、2[#]_{WD}和1[#]_{WDFT}、2[#]_{WDFT}中模型渠基土表面粗糙度相差较大(如图7所示)，更加易于崩解剥落现象的出现。

5 渠道劣化模式分析

前已述及，北疆季冻区膨胀土渠道边坡在经历干湿交替、冻融循环作用下的劣化失稳问题可以视为由上述两种破坏模式相互混合、叠加造成的，基于离心模型试验中渠道边坡劣化过程及特征，对渠道劣化模式进行分析：渠道运行期间(即湿润过程)，渠水入渗导致浅层土体饱和度增大，与深部土体之间存在一定的含水率差，渠基土由于湿化作用会产生一定的变形；渠道停水阶段(即干燥过程)，渠道浅层土体经历风冷干燥过程，渠道浅层渠基土中的水分流失，渠基土表面由于失水收缩产生细小、分散的张拉裂隙，导致浅层渠基土的强度降低，1[#]_{WD}、2[#]_{WD}已经证明往复的湿干作用造成了膨胀土渠道边坡浅层土体强度衰减和表面裂隙发育，并最终导致渠道边坡浅层崩解剥落式的失稳破坏^[8-9]。而现场渠道除经历以上干湿交替作用外，还受到冻融作用的影响，1[#]_{WDFT}、2[#]_{WDFT}中模拟的温度场变化(-40℃~30℃)使得渠基土在湿干过程中产生的微细裂隙往深层拓展、偏转，渠基土强度进一步降低^[15-16]，诱发渠道边坡发生竖直方向和水平方向的变形，并在渠顶与渠坡交界处产生一条贯穿渠顶的横向张拉裂隙^[26]。可以认为，耦合循环作用中的冻融过程对膨胀土渠道边坡劣化模式有着显著的影响，诱使膨胀土渠道边坡的劣化过程由浅层土体往深层土体发展，造成膨胀土渠道边坡在耦合循环作用下有着自贯穿渠顶的横向裂隙发生失稳破坏的趋势。

6 结论

通过自制的干湿装置以及自主研发的季冻区渠道湿干冻融离心模型试验设备，在离心场下分别

开展了渠道边坡劣化过程离心模型试验,探讨了耦合循环作用中的冻融过程对膨胀土渠道边坡劣化模式的影响,得出如下结论:

(1)湿干循环作用下膨胀土渠道边坡的劣化模式主要为浅层土体强度衰减和表面裂隙发育,同时伴随着显著的土体崩解剥落特征;湿干冻融耦合循环作用下膨胀土渠道边坡劣化过程中则未出现明显的土体崩解剥落现象,主要劣化模式为渠顶区域土体裂隙拓展、连通。

(2)耦合循环作用中的冻融过程对膨胀土渠道边坡的劣化模式具有显著的影响,诱使膨胀土渠道边坡的劣化过程由浅层土体往深层土体发展,在宏观上表现为渠顶及渠坡水位线以上区域土体裂隙的连通程度增高、拓展宽度及深度增大,并最终发展为贯穿渠顶的横向张拉裂隙,造成耦合循环作用下的膨胀土渠道边坡有着自贯穿渠顶的横向裂隙发生失稳破坏的趋势。

(3)耦合循环作用中的冻融过程还使得渠顶处的渠水入渗量大幅增长,造成渠顶土体的干湿循环幅度增大,进而诱发渠顶土体进一步地劣化。

参 考 文 献:

- [1] 郑澄锋,陈生水,王国利,等.干湿循环下膨胀土边坡变形发展过程的数值模拟[J].水利学报,2008,39(12):1360-1364,1376.
- [2] 许雷,刘斯宏,鲁洋,等.冻融循环下膨胀土物理力学特性研究[J].岩土力学,2016,37(S2):167-174.
- [3] RAO S M, REDDY B V V, MUTTHARAM M. The impact of cyclic wetting and drying on the swelling behaviour of stabilized expansive soils [J]. Engineering Geology, 2001, 60(1): 223-233.
- [4] 杜延龄.土工离心模型试验基本原理及其若干基本模拟技术研究[J].水利学报,1993(8):19-28,36.
- [5] WANG R, ZHANG G, ZHANG J M. Centrifuge modelling of clay slope with montmorillonite weak layer under rainfall conditions [J]. Applied Clay Science, 2010, 50(3): 386-394.
- [6] 陈生水,郑澄锋,王国利.膨胀土边坡长期强度变形特性和稳定性研究[J].岩土工程学报,2007,29(6):795-799.
- [7] 王国利,陈生水,徐光明.干湿循环下膨胀土边坡稳定性的离心模型试验[J].水利水运工程学报,2005(4):6-10.
- [8] 陈皓.膨胀土渠道在干湿循环作用下的稳定性研究[D].南京:南京水利科学研究院,2019.
- [9] 蔡正银,陈皓,黄英豪,等.考虑干湿循环作用的膨胀土渠道边坡破坏机理研究[J].岩土工程学报,2019,41(11):1977-1982.
- [10] 黄英豪,蔡正银,张晨,等.渠道冻胀离心模型试验设备的研制[J].岩土工程学报,2015,37(4):615-621.
- [11] 蔡正银,张晨,黄英豪.冻土离心模拟技术研究进展[J].水利学报,2017,48(4):398-407.
- [12] 张晨,蔡正银,黄英豪,等.输水渠道冻胀离心模拟试验[J].岩土工程学报,2016,38(1):109-117.
- [13] 唐少容,王红雨,潘鑫,等.U形混凝土衬砌结构冻胀性能离心模型试验研究[J].农业工程学报,2019,35(1):157-163.
- [14] 蔡正银,黄英豪.咸寒区渠道冻害评估与处治技术[M].北京:科学出版社,2015.
- [15] 蔡正银,朱洵,黄英豪,等.湿干冻融耦合循环作用下膨胀土裂隙演化规律[J].岩土工程学报,2019,41(8):1381-1389.
- [16] 朱洵.湿干冻融耦合作用下膨胀土渠道破坏机制及稳定性研究[D].南京:南京水利科学研究院,2019.
- [17] MILLER R D. Applications of Soil Physics [M]. New York: Academic Press, 1972.
- [18] SAVVIDOU C. Centrifuge modelling of heat transfer in soil [C]//Centrifuge 88, Balkema, Rotterdam. 1988: 583-591.
- [19] KRISHNAIAH S, SINGH D N. Centrifuge modelling of heat migration in soils [J]. International Journal of Physical Modelling in Geotechnics, 2004, 4(3): 39-47.
- [20] 张晨,蔡正银,徐光明,等.冻土离心模型试验相似准则分析[J].岩土力学,2018,39(4):1236-1244.
- [21] 林鑫,唐朝生,程青,等.基于数字图像相关技术的土体干缩开裂过程研究[J].岩土工程学报,2019,41(7):1311-1318.

- [22] 黄诗冰, 刘泉声, 刘艳章, 等. 低温热力耦合下岩体椭圆孔(裂)隙中冻胀力与冻胀开裂特征研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(3): 459-467.
- [23] 刘泉声, 黄诗冰, 康永水, 等. 低温冻结岩体单裂隙冻胀力与数值计算研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(9): 1572-1580.
- [24] 汤明高, 李松林, 许强, 等. 基于离心模型试验的库岸滑坡变形特征研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(3): 1-10.
- [25] 严晗, 王天亮, 刘建坤. 粉砂土反复冻胀融沉特性试验研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(11): 3159-3165.
- [26] CHEN T L, ZHOU C, WANG G L, et al. Centrifuge model test on unsaturated expansive soil slopes with cyclic wet-dry and inundation at the slope toe [J]. International Journal of Civil Engineering, 2018, 18 (10) : 1341-1360.

Influences of freeze-thaw process on the deterioration mode of expansive soil canal slope

CAI Zhengyin¹, ZHU Rui^{1, 2}, HUANG Yinghao¹, ZHANG Chen¹, GUO Wanli¹, CHEN Hao¹

(1. Geotechnical Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China;

2. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The actions of wet-dry and actions of freeze-thaw are two basic forms of the complex environment in the seasonally frozen soil regions, which affect the long-term stability of the water delivery canal significantly. Taking the expansive soil canal slope in North Xinjiang as the research object, centrifugal model tests on deterioration process of expansive soil canal slope under the action of wet-dry and coupling wet-dry and freeze-thaw were conducted to study the effect of freeze-thaw process on deterioration mode of expansive soil canal slope. The experimental results show that the deterioration mode of the expansive soil canal slope under the cyclic action of wet-dry is mainly the strength attenuation of shallow soil and the development of surface crack, accompanied by the significant characteristics of soil disintegration; During the deterioration process of the expansive soil canal under the cyclic action of coupled wet-dry and freeze-thaw, there is no obvious phenomenon of soil disintegration. The main deterioration mode is the development and connection of cracks on the canal top; The freeze-thaw process in the coupled wet-dry and freeze-thaw cycles makes the canal water infiltration at the canal top increase significantly, resulting in an increase in the wet-dry range of the soil at the canal top, which induces the deterioration of the expansive soil canal slope from shallow soil develops towards deep soil. The connectivity, width and depth of the cracks on the canal top increase, and eventually it develops into a lateral tensile crack through the canal top. The expansive soil canal slope has a tendency of instability due to lateral cracks running through the canal top under the cyclic action of coupled wet-dry and freeze-thaw.

Keywords: wet-dry and freeze-thaw; wet-dry cycles; expansive soil; canal slope; crack; centrifugal model tests

(责任编辑: 耿庆斋)