

文章编号: 1007-2993(2023)05-0609-05

# 冻融作用下高填方黄土抗剪强度劣化特性分析

孙杰龙<sup>1</sup> 王弘起<sup>2</sup> 李盛斌<sup>1</sup> 李大卫<sup>2</sup> 邱明明<sup>1</sup>

(1. 延安大学建筑工程学院, 陕西延安 716000; 2. 陕西建工第十三建设集团有限公司, 陕西延安 716000)

**【摘要】** 以延安新区高填方黄土为研究对象, 开展了冻融作用下高填方黄土抗剪强度试验研究, 分析了冻融作用对高填方黄土抗剪强度指标影响规律及其劣化特性。结果表明, 冻融作用下高填方黄土黏聚力随冻融循环次数增加而逐渐减小, 第4次冻融后黏聚力损伤增量达到最大, 之后随着冻融继续进行, 黏聚力损伤增量逐渐减小; 干密度相同时, 含水率越小黏聚力越大, 且在冻融作用下含水率越小, 黏聚力劣化幅值和速率越大, 冻融作用下内摩擦角没有明显规律性变化。给出了冻融作用下高填方黄土黏聚力损伤劣化模型, 并利用独立试验数据进行了验证, 结果表明该模型能较好地描述冻融作用下高填方黄土黏聚力劣化特征。

**【关键词】** 冻融; 高填方; 黄土; 抗剪强度; 劣化特性

**【中图分类号】** TU 411.7

**【文献标识码】** A

doi: 10.3969/j.issn.1007-2993.2023.05.015

## Deterioration Characteristics of High-fill Loess Shear Strength under Freeze-thaw

Sun Jielong<sup>1</sup> Wang Hongqi<sup>2</sup> Li Shengbin<sup>1</sup> Li Dawei<sup>2</sup> Qiu Mingming<sup>1</sup>

(1. School of Architecture and Civil Engineering, Yan'an University, Yan'an 716000, Shaanxi, China; 2. SCEGC No.13 Construction Engineering Group Company Ltd., Yan'an 716000, Shaanxi, China)

**【Abstract】** Taking the high-fill loess in Yan'an New Area as an example, the experimental study on the shear strength of high-fill loess under freeze-thaw action was carried out, and the influence of freeze-thaw action on shear strength index of high-fill loess and its deterioration characteristics were analyzed. The results show that the cohesive force of high-fill loess decreases gradually with the increase of freeze-thaw cycles under the action of freeze-thaw, after the fourth freeze-thaw cycle the cohesive force damage increases to the maximum, and then decreases gradually with the continuation of freeze-thaw. When the dry density is the same, the smaller the water content, the greater the cohesion, and the smaller the moisture content under freeze-thaw, the greater the amplitude and rate of cohesion deterioration. The internal friction angle has no obvious regular change under the action of freeze-thaw. The cohesive damage degradation model of high-fill loess under freeze-thaw action is given and verified by independent test data. The results show that the model can effectively describe the cohesive force degradation characteristics of high-fill loess under freeze-thaw.

**【Key words】** freeze-thaw; high fill; loess; shear strength; deterioration characteristics

### 0 引言

在黄土丘陵沟壑区采用平山、填沟等方法治理水土流失时, 会因土丘陵沟壑区特殊的工程环境和地质条件形成高填方边坡。而黄土丘陵沟壑区是半湿润半干旱区的过渡带, 气温年较差和日较差大, 夏季高温多雨, 冬季寒冷干燥。在这种季节性冻融作用下高填方边坡黄土抗剪强度会发生劣化, 导致高填方黄土边坡失稳, 对人民生命财产安全造成威胁。

冻融作用下黄土力学特性的研究成果较为丰

硕<sup>[1-4]</sup>。倪万魁等<sup>[5]</sup>采用镜扫描观测、单轴压缩试验和三轴剪切试验手段, 研究了冻融循环作用对黄土微结构和强度的影响。肖东辉等<sup>[6]</sup>对冻融循环作用下黄土孔隙率变化规律进行了研究。董晓宏等<sup>[7]</sup>对长期冻融循环下黄土强度劣化特性规律进行了研究。周泓等<sup>[8]</sup>以陕西富平重塑黄土为研究对象, 分析了不同次数的冻融循环作用下土体黏聚力的变化规律。张泽等<sup>[9]</sup>以重塑黄土为研究对象, 分析了冻融循环作用下黄土的孔隙特征。李国玉等<sup>[10]</sup>分析了冻融循

**基金项目:** 陕西省教育厅一般专项科学研究计划(20JK0985); 陕西省自然科学基金基础研究计划(2019JQ-832); 延安大学博士科研启动项目(YDBK2018-25); 陕西省大学生创新训练项目(S202210719080)

**作者简介:** 孙杰龙, 男, 1989年生, 汉族, 陕西宜川人, 博士, 副教授, 主要从事岩土与地下工程科研与教学工作。 E-mail: sunjielong@126.com

环作用对压实黄土的水分分布、变形以及干密度等工程地质特性的影响。宋春霞等<sup>[11]</sup>以兰州黄土为研究对象,分析了土的强度参数和前期固结压力在冻融循环作用下的变化规律。庞旭卿等<sup>[12]</sup>在分析不同初始含水率、低温温度和冻融循环对黄土力学性质影响的基础上,建立了冻融作用下黄土强度参数损伤模型。Viklander<sup>[13]</sup>基于冻融作用提出了残余孔隙比的概念。雷胜友等<sup>[14]</sup>基于CT扫描分析了原状黄土三轴剪切、浸水湿陷试验过程中的微结构变化规律。王朝阳等<sup>[15]</sup>采用三轴CT实时试验,对原状黄土三轴剪切过程中的应力-应变规律进行了分析。赵淑萍等<sup>[16]</sup>基于CT单向压缩试验研究了冻结重塑黄土损伤耗散势,得到了试样的屈服应变、损伤应变临界值和破坏应变临界值。王铁行等<sup>[17]</sup>对考虑含水率影响的非饱和原状黄土冻融强度进行了试验研究。王掌权等<sup>[18]</sup>对冻融作用下西安Q<sub>3</sub>原状黄土强度变化规律进行了分析。折海成等<sup>[19]</sup>对增湿-冻融劣化原状黄土结构强度进行了研究,得到了黄土在增湿和冻融情况下的压缩变形特征。赵鲁庆等<sup>[20]</sup>对冻融黄土微观结构变化规律及分形特性进行了研究。周春梅等<sup>[21]</sup>分析了干湿和冻融循环对压实黄土路用性能的影响。

国内外学者在黄土冻融力学特性方面取得了丰硕的研究成果,但冻融作用下高填方黄土抗剪强度劣化特性的研究还不多见。在前人研究的基础上,本文以延安新区高填方黄土为研究对象,开展冻融作用下高填方黄土抗剪强度试验研究,分析冻融作用下高填方黄土抗剪强度劣化特性,为黄土沟壑区高填方黄土边坡稳定性评价提供依据。

## 1 试验方案

在延安新区B4-06、B4-25高填方场地取样,取样后按照《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)制成含水率分别为14%、12%、9%和7%的试样,在制样过程中控制试样干密度为1.61 g/cm<sup>3</sup>,制备好的试样如图1所示。



图1 制备好的试样

试样制备完成后,开展冻融循环试验,将试样放入低温试验箱内冻结48 h,然后在常温下融化48 h,

温度变幅为-20~25℃;待试样解冻后,采用DSJ-3型应变控制式直剪仪(见图2)开展剪切试验,剪切速率为2.4 mm/min,法向应力分别为100 kPa、200 kPa、300 kPa和400 kPa。



图2 低温试验箱与直剪仪

## 2 试验结果分析

### 2.1 冻融循环对高填方黄土黏聚力影响

不同冻融循环次数下高填方黄土黏聚力变化如图3所示。

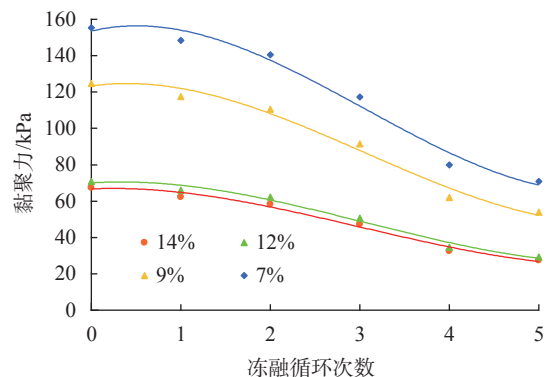


图3 黏聚力与冻融循环次数关系曲线

由图3可知,黏聚力随冻融循环次数增加而逐渐减小,主要是由于冻结过程中土颗粒周围的结合水膜结晶引起的体积膨胀对土颗粒产生挤压作用,导致土颗粒间的联结遭到破坏,进而引发黄土结构和强度劣化,黏聚力逐渐减小。干密度相同时,含水率越小黏聚力越大,这是因为含水率增大会使黄土颗粒间的结合水膜增厚,导致黄土黏聚力减小;第4次冻融后黄土结构强度损伤增量达到最大,之后随着冻融继续进行,黄土结构强度损伤增量逐渐减小。冻融作用下含水率越小,黏聚力劣化幅值和速率越大,主要是因为干密度相同时,黄土的含水率小时其结构强度高,因而在冻融作用下黏聚力的劣化幅值就越大。

### 2.2 冻融循环对高填方黄土内摩擦角影响

不同冻融循环次数下高填方黄土内摩擦角变化如图4所示。由图4可知,高填方黄土内摩擦角随冻融次数呈波浪形变化趋势,波动范围基本处于6°以内,无明显的规律性,主要是因为内摩擦角反映的

是土体颗粒间的联结方式, 而冻融作用对其影响相对较小。

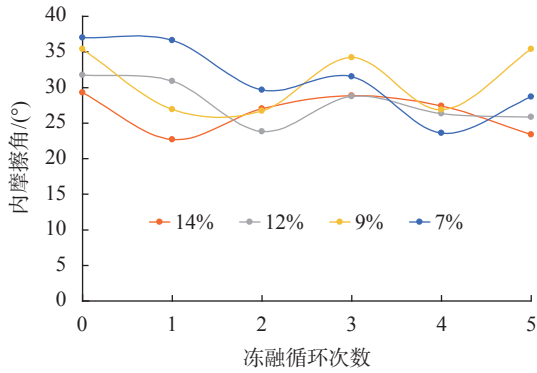


图4 内摩擦角与冻融次数关系曲线

### 3 冻融作用下高填方黄土黏聚力损伤劣化模型

由前述试验结果可知, 冻融后高填方黄土黏聚力衰减规律比较明显, 为了探求高填方黄土在冻融作用下的损伤劣化规律, 定义冻融损伤系数 $k_c$ 为:

$$k_c = \frac{c_0 - c_n}{c_0} \quad (1)$$

式中:  $c_0$ 为未冻融时黏聚力, kPa;  $c_n$ 为  $n$  次冻融后黏聚力, kPa。

高填方黄土黏聚力损伤系数与冻融次数的变化规律如图5所示。

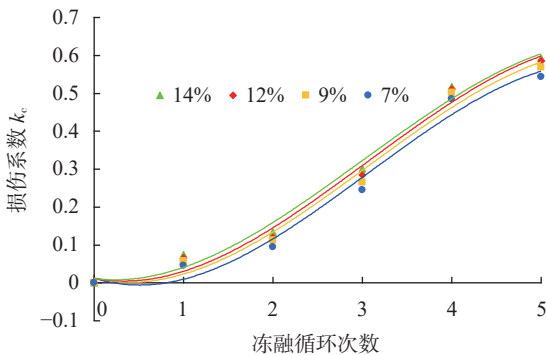


图5 黏聚力损伤系数与冻融次数关系曲线

由图5可知, 高填方黄土冻融损伤系数随冻融循环次数增加而增大, 但在第4次冻融后增大幅度减小, 冻融损伤系数随冻融循环次数呈三次多项式变化规律; 且随含水率增大, 高填方黄土冻融损伤系数增大, 这是由于在干密度相同的情况下, 在冻结作用下含水率越大, 产生的冻胀作用就越强, 对土体结构的破坏作用就越大, 冻融损伤随之增强。

由图3可知, 黏聚力和冻融次数符合三次多项式衰减关系, 可用式(2)所示的三次多项式拟合分析。

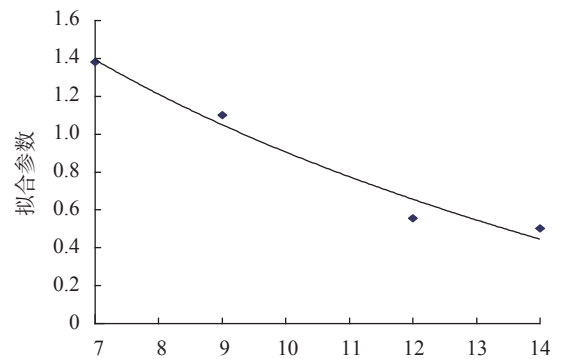
$$c = an^3 + bn^2 + dn + f \quad (2)$$

式中:  $c$ 为黏聚力, kPa;  $n$ 为冻融次数;  $a$ 、 $b$ 、 $d$ 、 $f$ 为拟合参数, 如表1所示。

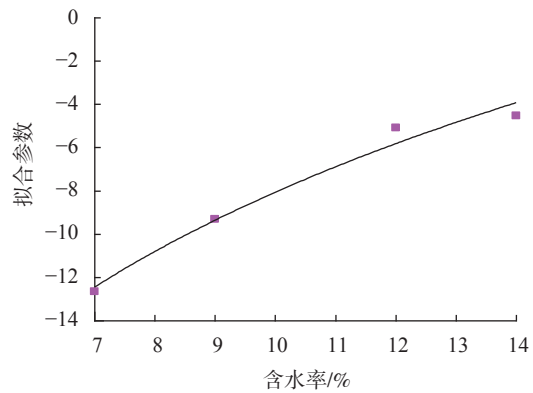
表1 拟合参数1

含水率/%	$a$	$b$	$d$	$f$	$R^2$
14	0.5025	-4.5237	2.0777	66.602	0.9884
12	0.5558	-5.0918	3.2835	69.862	0.9860
9	1.1013	-9.3090	7.0197	123.17	0.9839
7	1.3814	-12.655	11.807	153.40	0.9819

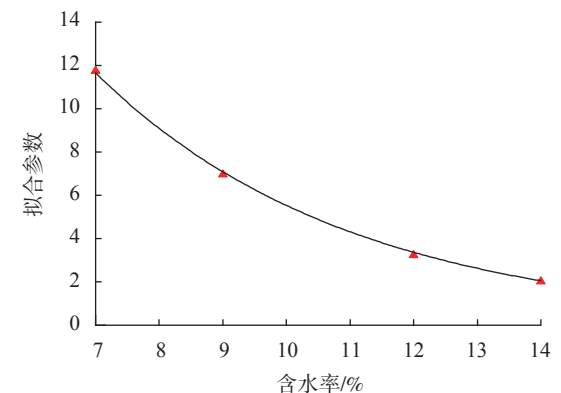
考虑含水率的影响, 以表1中的  $a$ 、 $b$ 、 $d$ 、 $f$  为已知参数进行拟合分析, 如图6所示。



(a) a



(b) b



(c) d

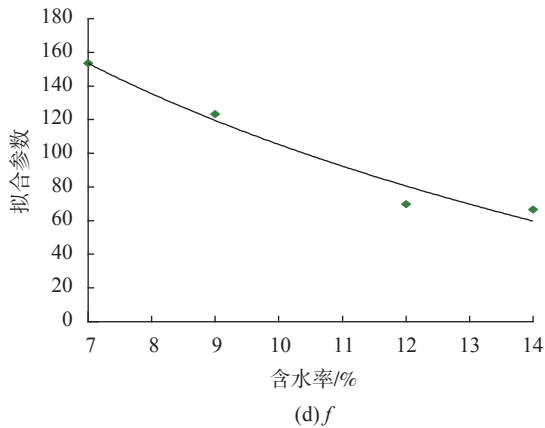


图6 含水率与拟合参数关系曲线

由图6可知,参数 $a$ 、 $b$ 、 $d$ 、 $f$ 与含水率的关系可用式(3)一式(6)表示,拟合结果见表2。

表2 拟合参数2

$a_1$	$a_2$	$R^2$
-1.3684	-2.2462	0.9705
$b_1$	$b_2$	$R^2$
12.298	20.247	0.9787
$d_1$	$d_2$	$R^2$
66.606	-24.899	0.9994
$f_1$	$f_2$	$R^2$
-135.24	-206.23	0.9673

$$a = a_1 \ln w - a_2 \quad (3)$$

$$b = b_1 \ln w + b_2 \quad (4)$$

$$d = d_1 e^{d_2 w} \quad (5)$$

$$f = f_1 \ln w + f_2 \quad (6)$$

将式(3)一式(6)代入式(2)可得高填方黄土黏聚力与含水率、冻融循环次数的关系表达式,如式(7)所示。

$$c = (-1.3684 \ln w - 2.2462)n^3 + (12.298 \ln w + 20.247)n^2 + (66.606e^{-24.899w})n + (-135.24 \ln w - 206.23) \quad (7)$$

利用独立试验数据(含水率15%)对计算模型进行验证(见图7)。由图7可知,由计算模型得到的数值与试验得到的数值误差较小,说明计算模型式(7)能较好地描述冻融作用下高填方黄土黏聚力劣化特性。

#### 4 结论

(1)冻融作用下高填方黄土黏聚力随冻融循环次数增加而逐渐减小;冻融作用下高填方黄土含水率越

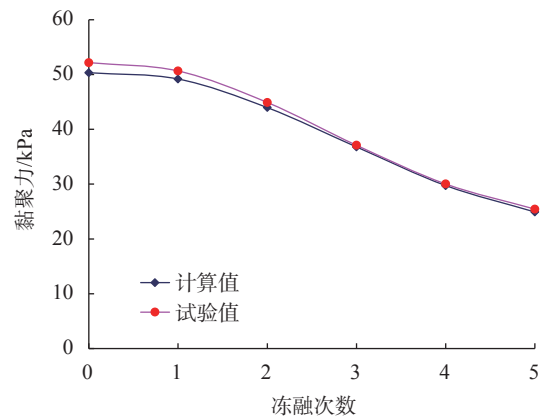


图7 计算模型验证

小,黏聚力劣化幅值和速率越大,内摩擦角没有明显规律性变化。

(2)干密度相同时,高填方黄土含水率越小黏聚力越大;第4次冻融后高填方黄土黏聚力损伤增量达到最大,之后随着冻融继续进行,高填方黄土黏聚力损伤增量逐渐减小。

(3)基于试验数据,分析了高填方黄土劣化特征,给出了高填方黄土黏聚力劣化模型表达式,并利用独立试验数据进行了验证,结果表明该模型能较好地描述冻融作用下高填方黄土黏聚力劣化特征。

#### 参考文献

- [1] 谢定义. 试论我国黄土力学研究中的若干新趋向[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(1): 3-13.
- [2] 郑方, 邵生俊, 王松鹤. 复杂应力条件下冻融作用对黄土强度的影响[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(S1): 224-228.
- [3] 许健, 张明辉, 李彦锋, 等.  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ 盐渍原状黄土冻融过程劣化特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(9): 1642-1650.
- [4] 李宝平, 平高权, 张玉, 等. 平面应变条件下冻融循环对黄土力学性质的影响[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2021, 43(2): 41-48.
- [5] 倪万魁, 师华强. 冻融循环作用对黄土微结构和强度的影响[J]. 冰川冻土, 2014, 36(4): 922-927.
- [6] 肖东辉, 冯文杰, 张泽. 冻融循环作用下黄土孔隙率变化规律[J]. 冰川冻土, 2014, 36(4): 907-912.
- [7] 董晓宏, 张爱军, 连江波, 等. 长期冻融循环引起黄土强度劣化的试验研究[J]. 工程地质学报, 2010, 18(6): 887-893.
- [8] 周泓, 张豫川, 张泽, 等. 冻融作用下冻结黄土黏聚力长期强度变化规律[J]. 岩土力学, 2014, 35(8): 2241-2246, 2254.
- [9] 张泽, 周乱, 秦琦, 等. 冻融循环作用下黄土的孔隙特征试验[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2017,

- 47(3): 839-847.
- [10] 李国玉, 马 巍, 李 宁, 等. 冻融对压实黄土工程地质特性影响的试验研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2010, 8(4): 5-7,20.
- [11] 宋春霞, 齐吉琳, 刘奉银. 冻融作用对兰州黄土力学性质的影响[J]. 岩土力学, 2008, 29(4): 1077-1086.
- [12] 庞旭卿, 胡再强, 刘 寅. 冻融循环作用对黄土力学性质损伤的试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2016, 13(4): 669-674.
- [13] VIKLANDER P. Permeability and volume changes in till due to cyclic freeze-thaw[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1998, 35(3): 471-477.
- [14] 雷胜友, 唐文栋. 黄土在受力和湿陷过程中微结构变化的CT扫描分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 23(24): 4166-4169.
- [15] 王朝阳, 许 强, 倪万魁. 原状黄土CT试验中应力-应变关系的研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(2): 387-396.
- [16] 赵淑萍, 马 巍, 郑剑锋, 等. 基于CT单向压缩试验的冻结重塑兰州黄土损伤耗散势研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(11): 2019-2025.
- [17] 王铁行, 罗少锋, 刘小军. 考虑含水率影响的非饱和原状黄土冻融强度试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(8): 2378-2382.
- [18] 王掌权, 许 健, 郑 翔, 等. 反复冻融条件下黄土边坡稳定性分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2017, 28(2): 15-21.
- [19] 折海成, 胡再强, 薛 婷, 等. 增湿-冻融劣化原状黄土结构强度试验研究[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(4): 1558-1566.
- [20] 赵鲁庆, 杨更社, 吴 迪, 等. 冻融黄土微观结构变化规律及分形特性研究[J]. 地下空间与工程学报, 2019, 15(6): 1680-1690.
- [21] 周春梅, 王琴华, 张静波, 等. 干湿和冻融循环对压实黄土路用性能影响的试验研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2019, 39(3): 533-540.

收稿日期: 2022-07-13