第 44 卷	第5期	
2022 年	59月	CHI

吴旭阳,任明洋,黄俊杰,等.兰州重塑黄土抗拉强度冻融特性与衰减模型研究——基于轴向压裂法[J].地震工程学报,2022,44 (5):1041-1049.DOI:10.20000/j.1000-0844.20211021001

WU Xuyang, REN Mingyang, HUANG Junjie, et al. Freeze-thaw characteristic and attenuation model of tensile strength of Lanzhou remolded loess based on the axial splitting method[J].China Earthquake Engineering Journal, 2022, 44(5):1041-1049. DOI:10.20000/j.1000-0844.20211021001

兰州重塑黄土抗拉强度冻融特性与衰减模型研究 ——基于轴向压裂法

吴旭阳¹,任明洋¹,黄俊杰¹,梁庆国²,王 园³

(1.河南城建学院土木与交通运输学院,河南平顶山 467036; 2.兰州交通大学土木工程学院,甘肃兰州 730070;3.河南城建学院材料与化工学院,河南平顶山 467036)

摘要:针对季节性冻土区黄土路堑边坡在冻融作用下发生剥落的病害问题,黄土抗拉强度的影响不可忽略。以兰州和平镇某人工路堑边坡重塑黄土为研究对象,着重探讨黄土抗拉强度冻融衰减特性。首先采用轴向压裂法测定不同含水量、不同干密度及不同冻融次数下的黄土抗拉强度,然后在黄土抗拉强度冻融衰减规律的基础上提出单因素抗拉强度冻融衰减模型,而后对含水量、干密度以及抗拉强度进行多元非线性回归分析,进而提出黄土多元抗拉强度冻融衰减模型。研究结果表明:黄土抗拉强度随冻融循环次数增加呈指数衰减规律,一般冻融 3~5次后抗拉强度达到稳定值,初始含水量对黄土抗拉强度冻融衰减率的影响较大。多元抗拉强度衰减模型可对以含水量、干密度及冻融循环次数为变量的兰州黄土抗拉强度进行预测。

关键词:重塑黄土;冻融循环;抗拉强度;衰减模型

中图分类号: TU411 **文献标志码:**A **文章编号:** 1000-0844(2022)05-1041-10 DOI:10.20000/j.1000-0844.20211021001

Freeze-thaw characteristic and attenuation model of tensile strength of Lanzhou remolded loess based on the axial splitting method

WU Xuyang¹, REN Mingyang¹, HUANG Junjie¹, LIANG Qingguo², WANG Yuan³

(1. School of Civil Engineering and Transportation, Henan University of Urban Construction, Pingdingshan 467036, Henan, China;
 2. School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong Universit, Lanzhou 730070, Gansu, China;

3. School of Materials and Chemical Engineering, Henan University of Urban Construction, Pingdingshan 467036, Henan, China)

Abstract: In view of the freeze-thaw spalling disease for loess cutting slopes in seasonal frozen regions, the effect of loess tensile strength cannot be ignored. Remolded loess taken from an artificial cutting slope in Heping Town, Lanzhou City, was analyzed in this paper to discuss the freeze-thaw attenuation characteristics of loess tensile strength. First, the tensile strength of loess samples under different water contents (11%, 13%, 15%, 17%, and 19%), different dry densities $(1.55, 1.60, 1.65, 1.70, and 1.75 \text{ g/cm}^3)$, and different freeze-thaw cycles (0, 1, 3, 5, 7, 7)

收稿日期:2021-10-21

基金项目:国家自然科学基金(51968041);河南省科技攻关项目(212102310965,212102310933);河南省青年自然科学基金项目 (212300410106);河南省大学生创新创业训练计划项目(S202111765026,S202111765049)

第一作者简介:吴旭阳(1987-),男,河南许昌人,博士,讲师,主要从事岩土体力学特性及地下工程方面的教学与科研研究工作。 E-mail:20181019@hncj.edu.cn。

11, and 15) were measured with the axial splitting method. Then, a single-factor freeze-thaw attenuation model for loess tensile strength was proposed based on the freeze-thaw attenuation law of loess tensile strength. Finally, the multivariate freeze-thaw attenuation model for loess tensile strength was proposed based on a multivariate nonlinear regression analysis of water content, dry density, and tensile strength. Results show that the tensile strength presents an exponential decay with the increase of freeze-thaw cycles and reaches a stable value after three to five freezethaw cycles; the initial water content has a great influence on the freezing-thawing attenuation of loess tensile strength. The multivariate freeze-thaw attenuation model of loess tensile strength can forecast the tensile strength of Lanzhou loess with water content, dry density, and freezethaw cycles as variables.

Keywords: remolded loess; freeze-thaw cycles; tensile strength; attenuation model

0 引言

随着我国西部大开发战略的实施,在黄土地区 建设高速公路,不可避免地要进行大量开挖,在季节 性冻土分布区,太阳辐射和地表状况有明显的日变 化和季节性变化,土体的冻结与融化反复进行,将会 对土体的物理力学性质产生重要影响[1-2]。已有研 究表明,冻融循环作用对黄土黏聚力[3-4]及无侧限抗 压强度[5]具有弱化作用,对内摩擦角影响不大[6-7]。 随着冻融循环次数的增加,黄土冻结过程中冰晶冻 胀力破坏土体结构[8-10],融化时结构不可恢复,反复 冻融是造成土体强度弱化主要原因。从微观角度来 看[11-12],随着冻融次数的增加,土体孔隙中的大孔径 先减少,后增多;小孔径先增多,后减少,最后向5~ 10 μm 范围内集中。另外,冻融循环会造成土样原 孔隙扩展、伸长、分叉、贯通[13],黄土的原始胶结结 构逐渐被破坏[14],颗粒重新排列,土的结构越来越 疏松,颗粒之间原始固有胶结逐渐减弱,造成黏聚力 不断降低。综合黄土冻融特性的研究成果来看,黄 土的抗剪强度、无侧限抗压强度、压缩性[15]、孔隙特 征分布、微观结构特性、湿陷性[16]等方面备受研究 人员关注,并取得了可喜研究成果,对季节冻土区黄 土路基冻融病害防治具有重要指导意义。然而对于 黄土路堑边坡剥落病害,最主要是由坡面黄土在冻 融条件下强度劣化引起[17],且大部分学者[17-20]都从 抗剪强度冻融弱化的角度出发去阐释边坡剥落的机 理,而边坡剥落通常发生在表层,在这个过程中,黄 土边坡的剥落灾害是在表层黄土颗粒拉-剪耦合作 用下发生,黄土的抗拉强度在冻融过程中的弱化也 起到了关键作用,但是目前关于黄土抗拉强度冻融 特性的研究鲜有报道。另外,对原状黄土路堑边坡 来说,坡面不同程度的剥落病害极大地影响了黄土

边坡的整体稳定性^[18],极有可能导致边坡整体发生 滑移而影响公路的正常使用,对过往的行人和车辆 也是一种潜在的危险^[19],同时剥落也降低了坡面的 美观程度,不符合现代公路建设"安全、环保、舒适、 和谐"的要求。所以,对黄土抗拉强度冻融衰减特性 的研究可以为边坡剥落病害提供更合理的解释,研 究成果也能够为工程防治措施提供更好的指导 建议。

1 试验材料及试验方法

1.1 土样来源及物理特性

试验用黄土取自兰州市和平镇路堑边坡,该边 坡高约 80 m。有研究表明,季节性冻黄土区域内最 大冻深一般在 1 m 以内,故此次试验用土取自坡顶 平缓位置,地下 2 m 深度处未经冻融过的黄土。该 地区为 Q₃黄土,土质呈褐黄色,塑限 15.36%,液限 28.67%,塑性指数 13.30,最优含水量 16.5%,最大 干密度 1.75g•cm⁻³,颗粒密度 2.72 g•cm⁻³。颗 粒级配采激光测分仪测定结果如图 1 所示。



1.2 试验方法及试样制备

1.2.1 试验方法

抗拉强度采用轴向压裂法间接测定[图 2(b)], 试样直径控制为 6.18 cm,高度 6.25 cm,加载柱为 直径 1.545 cm,高度 2 cm 的刚性圆柱,轴心对中环 采用内直径为 1.55 cm,厚度 0.2 cm 的铝制空心圆 环,抗拉强度试验在 GTS 万能试验机上进行[图 2 (a)],通过刚性加载柱施加轴向荷载,加载速率控制 为 1.0 mm/min,抗拉强度计算公式为^[21-22]:

$$\sigma_{t} = \frac{P}{\pi \left(KbH - a^{2} \right)} \tag{1}$$

式中: σ_t 为抗拉强度(kPa);P 为荷载(N);K 为与土壤 类别性质相关的参数,本试验取 1^[23];b 为试样半径 (cm);H 为试样高度(cm);a 为加载圆柱半径(cm)。



①数据采集系统 ②压力传感器 ③试样室及加载装置 ④加载柱 ⑤轴心对在环

图 2 GTS 万能试验机试验过程

Fig.2 Test process using the GTS universal testing machine

1.2.2 试样制备

试样制备采用静压制样法。首先,控制含水量 分别为:11%、13%、15%、17%、19%,相同含水量下 控制干密度分别为:1.55 g・cm⁻³、1.60 g・cm⁻³、 1.65 g・cm⁻³、1.70 g・cm⁻³、1.75 g・cm⁻³;冻融 循环次数分别设计为 0 次、1 次、3 次、5 次、7 次、11 次、15 次,每个试样设计一个平行样,取其测定值的 平均值作为最终抗拉强度值,试验依次共完成 350 个样品。将制好的试样用保鲜膜紧贴试样包裹,而 后用宽胶带绕缠密封[图 2(c)],防止在冻融过程中 水分散失,最后设定冻结 12 小时融化 12 小时为一 次冻融循环,冻结过程将试样置于一16 ℃冷冻恒温 冰箱中[图 2(d)],融化过程置于室温(25 ℃)自由融 化(由于试验期间为6月至9月之间,室外温度相对 较高,满足融化过程需要),待冻融循环次数达到目 标要求,即进行抗拉强度试验。

2 试验结果与分析

2.1 抗拉强度与冻融循环的关系

2.1.1 冻融循环对抗拉强度-贯入深度特性的影响

文中贯入深度指上下加载柱沿试样轴线的相对 位移。以含水量 15%,干密度 $1.60 g \cdot cm^{-3}$ 的试样为 例,由图3可看出,抗拉应力随贯入深度的增大而增 大, 达到峰值强度后有一陡降过程, 陡降幅度达到其 抗拉强度的 1/3, 而后随贯入深度的增加呈上凸型逐 渐减小,这是因为加载柱下方楔形体形成后相对移 动过程中与劈裂面土颗粒相互摩擦作用引起,该过 程残余抗拉强度主要由摩擦强度组成,就其强度值 而言,未冻融的黄土抗拉强度最高可达 16.9 kPa,冻 融一次降低幅度最大,降为13.1 kPa,而后冻融3次 以后抗拉强度降到最低且基本趋于稳定,稳定于12 kPa左右。对于其抗拉强度随贯入深度发展关系而 言,图4可看出,抗拉强度随贯入深度的增加先由A 点线性增大至 B 点,而后 BC 段相对平缓,而后由 C点近似线性增至峰值抗拉应力D点(抗拉强度), 在此过程中,AB段可认为弹性阶段,即刚性柱与试 样接触并压缩的初始阶段,BC 段为加载柱上下方 土体逐渐压缩挤密^[21],即楔形体形成阶段,在此之 前试样轴向加载抗力主要由形成楔形体过程中的剪 切力承担,C点之后,楔形体形态基本形成,并沿轴 线相对运动,从而产生劈裂力,CD 段主要试样主要 在楔形体作用下处于受拉状态,D点达到抗拉强 度,从试样随贯入深度变化的形态来看,试样在达到









图 4 试样随贯入深度的破坏过程

Fig.4 Failure process of specimen with penetration depth 抗拉强度之前,外边没有明显裂纹出现,当达到抗拉强度 D 点时,试样表面初始裂纹出现,而后裂纹迅

速扩张,同时伴随拉应力急剧减小至 E 点,此时试样 上下裂纹贯通,在此之后(EF 段)拉应力随贯入深度 呈现上凸型减小,这是由于此时试样内部抗力主要有 楔形体楔形剪切面与颗粒摩擦产生,此过程中的试样 残余抗拉强度已经非常小。F 点以后抗拉应力随贯 入深度的增大呈下凹式减小,并伴随试样拉裂纹宽度 逐渐增大,最终至试样完全破裂为两瓣或者三瓣,轴 向压裂法测定黄土抗拉强度试验结束。

2.1.2 冻融循环对抗拉强度的影响

取不同含水量及不同干密度下 350 个试样抗拉 强度随冻融循环变化的试验数据,取平行试验平均值 作为该试样真实抗拉强度值,共 175 个数据点,根据 同一干密度进行分组,每组每个含水量下不同冻融循 环次数为一单组如图5所示。干密度1.55 g•cm⁻³时抗



拉强度随冻融循环次数的增加衰减程度较小,基本 没有变化,随着干密度的增大,冻融作用逐渐显著。

干密度为 1.55 g • cm⁻³ 含水量 11% 和 13% 及 干密度 1.60 g • cm⁻³ 含水量 11%条件下试样在冻 融一次时抗拉强度最高,在经历三次冻融循环时抗 拉强度减小至最低值,由此说明冻融作用对黄土颗 粒间抗拉接触黏结具有弱化作用,冻融循环四次以 后其抗拉强度基本稳定。对于含水量相对较大 (w=15%, w=17%, w=19%)的黄土抗拉强度在 经历1次冻融循环后强度呈衰减状态,且在基本均 是在3次冻融作用时强度降至最低,而后随冻融作 用的增加变化幅度不大,这是由于含水量较大时颗 粒之间的孔隙相对较小,土颗粒外侧水膜厚度较大, 颗粒间分子引力及颗粒间的接触黏结强度均较大, 也就是说颗粒骨架较强,故其未冻融时的抗拉强度 较大,在冻结过程中,初始含水量可能达到或者大于 土样起始冻胀含水量,土样会在冻结过程中发生冻 胀,由于外部温度低,内部温度高,从而引起水分由 试样中心向外缘冻结面迁移,在此过程中土样自身 原有颗粒间黏结结构遭到破坏,大颗粒团簇结构会 破碎,颗粒之间裂隙增多,间距增大,颗粒与颗粒之 间的排列方式发生改变,在融化过程中,冰融化成水, 体积减小形成孔隙,在水分迁移力作用下部分土颗粒 会在融化过程中填充这些孔隙,然后有大量孔隙无法 填充,这是造成黄土冻融衰减的主要原因,故在冻融 1次、3次作用下其抗拉强度均呈减小状态,含水量 15%的土样在超过3次冻融循环后其抗拉强度随冻 融次数的增多或略微增大或持续减小,然而就其强度 大小而言,基本趋于稳定。不同含水量及干密度下黄 土抗拉强度随冻融循环次数均呈指数衰减关系,指数 衰减方程为: $\sigma_t = a e^{(-n/b)} + c$,具体系数如表1所列。

2.2 冻融循环对抗拉强度衰减率的影响

冻融循环下强度衰减率通过下式计算:

$$\Psi = \frac{\sigma_0 - \sigma_n}{\sigma_0} \tag{2}$$

式中: Ψ 为冻融衰减率(%); σ 。为未冻融时的强度 值(kPa); σ 。为冻融 n 次时的强度值(kPa)。

由抗拉强度不同含水量不同干密度在经历各次 冻融循环后的衰减程度可看出(图 6),抗拉强度衰减 率在 3 次冻融时达到最大,而后在 5 次冻融后有所提 高,最终稳定。其中干密度 1.55 g•cm⁻³的抗拉强度 衰减率在经历多次冻融后相对最小,最终稳定于 20%左右;而干密度 1.60 g•cm⁻³、1.65 g•cm⁻³、 1.70 g•cm⁻³、1.75 g•cm⁻³冻融衰减率则在一次 冻融时衰减程度最大,可达15%~20%,3次冻融时 衰减率最大,可达30%以上。含水量19%时,冻融 作用对其强度衰减程度影响较大,随着冻融次数的 增加强度衰减率持续增大,最终可达50%左右。图 6(e)可看出含水量较高时冻融作用对其强度影响不 大,这是由于含水量超过临界值后其强度本身就很 低,而经历冻融作用后从其强度值方面看确实变化 不大,但是如果从其衰减程度上看,其衰减率时最高 的,由此可见,含水量越大,冻融作用越明显。

表 1 各干密度与含水量下抗拉强度随冻融循环的指数 衰减系数

Table 1 The exponential attenuation coefficient of tensile strength with freezing-thawing cycles under different dry densities and different water contents

w/%	$ ho_{\rm d}/({ m g}\cdot{ m cm}^{-3})$	а	b	С	$R^{_2}$
11	1.55	0.78	7.36	7.89	0.258 3
	1.60	4.20	2.20	9.53	0.810 4
	1.65	3.77	0.86	12.19	0.862 6
	1.70	5.58	0.84	14.78	0.928 1
	1.75	8.19	0.57	16.54	0.986 6
	1.55	3.40	1.05	6.35	0.898 8
	1.60	3.92	1.09	8.03	0.987 7
13	1.65	4.07	0.74	10.72	0.907 8
	1.70	6.64	0.57	12.79	0.969 7
	1.75	8.04	0.74	14.48	0.986 8
15	1.55	1.55	1.06	5.38	0.965 0
	1.60	1.80	1.27	6.89	0.924 2
	1.65	3.61	0.57	8.47	0.969 7
	1.70	0.63	3.85	10.34	0.960 9
	1.75	4.43	0.62	12.39	0.982 1
17	1.55	0.78	0.86	4.11	0.841 2
	1.60	1.27	0.55	5.34	0.672 9
	1.65	1.69	0.02	6.44	0.804 5
	1.70	3.10	0.004	7.69	0.972 2
	1.75	3.97	0.75	9.23	0.944 1
19	1.55	1.86	1.02	2.20	0.987 0
	1.60	2.42	1.89	2.53	0.986 0
	1.65	3.12	1.74	3.19	0.980 5
	1.70	4.44	1.18	3.95	0.990 6
	1.75	5.15	0.99	4.70	0.986 2

注:指数衰减方程为: $\sigma_t = a e^{(-n/b)} + c$;相关系数为 R^2 。

现将不同含水量不同干密度下抗拉强度在多次冻 融循环后的最大衰减率列于表 2 中,可看出,不同含水 量下抗拉强度最大衰减率的方差与变异系数均相对较 小,由此可将黄土按照含水量不同而区分其最大冻融 衰减率,即用同一含水量下不同干密度在多次冻融循 环后的最大衰减率的平均值作为该含水量下的一般最 大冻融衰减率。由表 1 可知,含水量 11%,13%、15%、 17%时抗拉强度最大衰减率在 30%左右,而当含水量 19%时,抗拉强度最大衰减率较大在 52%左右。



图 6 不同含水量下抗拉强度随冻融循环的衰减率

Fig.6 Attenuation rate of tensile strength with freezing-thawing cycles under different water contents

表 2 不同含水量及干密度的最大冻融衰减率

Table 2	Maximum freezing-thawing attenuation rate under
	different water contents and different dry densities

рd	w / %				
$/(g \cdot cm^{-3})$	11	13	15	17	19
1.55	24.63	25.22	25.52	19.89	48.27
1.60	28.07	33.24	23.93	28.43	48.53
1.65	32.59	42.01	33.59	28.02	49.22
1.70	30.60	34.13	29.58	32.32	56.23
1.75	35.18	37.65	27.83	33.39	55.63
\overline{x}	30.21	34.45	28.09	28.41	51.58
\$	4.07	6.21	3.76	5.31	4.00
C v	0.13	0.18	0.13	0.19	0.08
注: \bar{x} 为算术平均值, $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} x_i$; x_i 为实测值; n 为样本总数; s					
为标准差, $s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})^2}; c_v$ 为变异系数, $c_v = \frac{s}{\bar{x}}$ 。					

2.3 黄土抗拉强度冻融衰减模型

2.3.1 单因素抗拉强度冻融衰减模型

为探究不同含水量与相同冻融循环条件下其抗 拉强度衰减率的关系,现对已有数据进行如下处理: 首先将同一含水量相同冻融次数不同干密度的强度 衰减率取平均值,用来近似反映在某一含水量及冻融 循环次数下的强度衰减率,而后通过该平均值结合不 同含水量及冻融循环次数进行整理,结果如图 7 所 示,含水量 19%时,每次冻融造成的抗拉强度衰减率 均最大。1 次冻融时,含水量 11%的抗拉强度衰减率 最小,接近 5%,含水量 13%、15%、17%的抗拉强度 衰减率比较接近,接近 18%。冻融 3 次后不同含水量 衰减程度差异表现出来,其中含水量 13%、15%、17% 11%的抗拉强度衰减率处于第三位,19%含水量时抗 拉冻融衰减率最大。15次冻融循环时,11%、13%、 15%、17%含水量下冻融衰减率基本处于30%左右, 19%含水量下冻融衰减率处于52%。由以上分析可 知,含水量19%时与其他含水量的强度冻融衰减率 在不同冻融循环次数下有较大差异,故将19%含水 量的强度衰减率单独指数衰减拟合。将11%、13%、 15%、17%含水量下随冻融循环次数的强度衰减率进 行全部数据指数衰减拟合,得出的拟合结果如图7所 示,并将拟合参数列于表3中。通过拟合方程来近似 反映黄土不同含水量下强度衰减率随冻融循环次数 的增加而变化的量化规律。由表3中拟合参数可看 出,参数 *a* 与*c* 的绝对值相差不大,差值平均为 0.6%,故将 *a* 与*c* 的绝对值简化为等值,即冻融循环 对黄土强度衰减率的影响可通过下式描述:



图 7 不同含水量下抗拉强度衰减率与冻融循环 次数的关系

Fig.7 Relationship between the attenuation rate of tensile strength and the number of freezing-thawing cycles under different water contents

表 3 不同含水量下冻融衰减率的拟合参数

 Table 3
 Fitting parameters of freezing-thawing attenuation

 ratio under different water content

方程: $\Psi = a e^{(-n/b)} + c$	а	b	С	相关系数 (R ²)
抗拉强度含水量小于19%	-27.88	1.13	27.42	0.705 7
抗拉强度含水量等于 19%	-49.53	1.21	49.58	0.996 0

2.3.2 多元抗拉强度冻融衰减模型

以上研究均以控制变量为核心,即控制含水量 不变探讨干密度变化是对抗拉强度的影响或者控制 干密度不变探讨含水量对抗拉强度的影响。然而实 际上干密度与含水量对黄土强度的影响同时存在, 为探究黄土抗拉强度与含水量和干密度的多元相关 关系,通过 Tablecurve3D 可得出未冻融情况下抗拉 强度、含水量、干密度多元三维空间分布情况,如图 8(a)所示,可看出黄土强度随含水量的减小及干密 度的增大呈螺旋状上升趋势,通过对所生成曲面进 行三维多元非线性拟合可看出[图 8(b)],抗拉强度 随含水量及干密度服从多元非线性方程:

$$\sigma_t = \mathrm{e}^{-174.18w^3 - \frac{12.54}{\rho_d} + 10.63} \tag{4}$$

相关系数均达到 0.99 以上。

如果引入冻融循环衰减率变量(Ψ),则可近似 求解各种含水量及干密度条件下在不同冻融情况下 的抗拉强度值,即:

$$\sigma_{t-n} = \sigma_{t-0} \left(1 - \Psi_{\sigma t} \right) \tag{5}$$

式中:σ_{t-n} 为冻融 n 次时的黄土抗拉强度值;σ_{t-0} 为 未冻融时的黄土抗拉强度值;Ψ_{ot}为黄土不同冻融次 数下的抗拉强度的衰减率变量。由于黄土在含水量 19%时的抗拉强度冻融衰减率与其他含水量下有较 大差异,故将含水量 19%时单独考虑。



Fig.8 Multivariate nonlinear relationship among the water content, dry density, and tensile strength without freezing and thawing

综合整理[联立式(3)、(4)、(5)]可得不同含水 量(不包括含水量≥19%)以及不同干密度条件下黄 土经历 n(n≥1)次冻融循环后的抗拉强度值可表 示为:

$$\sigma_{t-n} = [1 - 27.88(1 - e^{\left(\frac{-n}{1.13}\right)})] e^{\left(-174.18w^3 - \frac{12.54}{\rho_d} + 10.63\right)}$$
(6)

含水量为19%时,不同干密度条件下黄土经历 n次冻融循环后的抗拉强度值可表示为:

$$\sigma_{t-n} = [1 - 49.53(1 - e^{\left(\frac{-n}{1.21}\right)})] e^{\left(-174.18w^3 - \frac{12.54}{\rho_d} + 10.63\right)}$$
(7)

3 讨论

黄土是一种具有结构性与水敏感性的特殊土,此 次研究所取黄土试样具有不同孔隙比与饱和度,理论 上对于含水量在塑限以下,其冻融过程中水分对结构 甚至颗粒的影响不大,即不会对抗拉强度产生较大影 响。但是试验结果显示,干密度为 1.55 g·cm⁻³含水 量 11%和 13%及干密度 1.60 g·cm⁻³含水量 11% 条件下试样在冻融一次时抗拉强度最高,在经历三 次冻融循环时抗拉强度减小至最低值。可能原因是 初始干密度较小及含水量较小情况下颗粒间排列较 为疏松,空隙较大,在经历第一次冻结过程中,由于 冻胀破坏了初始团簇大颗粒黏结状态从而在冻结过 程中破碎,变成相对较小的颗粒,在融化过程中相对 较小的颗粒位置发生变化填充了原本较大的空隙, 使得颗粒与颗粒接触数目增多,黏结增强,故在经历 一次冻融后强度呈增大趋势,具体原因尚需补充一 次冻融过程中土体微观颗粒状态及孔隙特征加以证 明。而后的冻融过程中,其抗拉强度具有较为明显 的衰减作用,究其原因可能与其冻融过程伴随颗粒 间水分迁移与胀缩有关。已有研究表明[11-12],冻融 作用可引起非饱和黄土黏粒含量增多,小孔隙减少, 大孔隙增多,说明非饱和黄土在冻融过程中结构发 生了破坏,是引起抗拉强度衰减的主要原因。然而, 结构的破坏有可能是在冻结过程中水分向小孔隙处 迁移集中(大孔隙处由于水分不足以填充产生的冻 胀力弱)由冻胀力引起,也有可能在融化过程中水分 集中融化弱化了颗粒之间的黏结致使抗拉强度降 低,或是两者对抗拉强度的衰减均有贡献,这是个值 得探讨的问题。对于含水量高(19%)其衰减率高的 问题,有可能是因为其初始抗拉强度更低,相对衰减 率就更高,实际上冻融作用对高含水量黄土的抗拉

强度影响更小,如果用相对强度衰减率来表征黄土 的冻融衰减程度,则高含水量(>17%)与低含水量 (≤17)黄土不建议采用同一套标准来衡量,此次研 究仅仅提供了19%的高含水量样品,数据相对较 少,下一步计划补充饱和黄土的冻融循环强度试验, 来完善高含水量条件下的冻融强度衰减模型。图 8 中的数据为每种含水量下不同干密度每次冻融之后 强度衰减率的平均值,所拟合出的曲线方程体现了 黄土抗拉强度冻融衰减特性的一般规律,旨在说明 拟合参数及方程对于兰州及其周边黄土具有一定适 用性,是否对于其他地区黄土具有适用性或者对公 式进行修正后是否对黄土抗拉强度冻融衰减规律具 有普适性尚需进一步研究(用其他地区不同性质的 黄土抗拉强度冻融试验结果加以验证)。另外,黄土 边坡剥落病害是由于边坡表层黄土冻融作用引起, 其剥落机理不仅仅是由于抗剪强度弱化不足引起, 与其抗拉强度的弱化也有关系,应该由拉-剪耦合强 度破坏准则去解释更为合理,故笔者在已有研究的 基础上,计划下一步进行黄土冻融拉-剪耦合强度破 坏准则的研究工作。

4 结论

此次黄土抗拉强度冻融特性及衰减模型的研究 工作是在多组试验数据的基础上探索其规律的普遍 性同时发现其特殊性,得出如下结论:

(1)对于文中在低干密度、低含水量的情况下 (如干密度为1.55g·cm⁻³含水量11%和13%及干 密度1.60g·cm⁻³含水量11%),试样在冻融一次 时抗拉强度最高,而后冻融过程抗拉强度减小至最 低值,说明抗拉强度随冻融循环次数并不完全呈现 衰减特性。但是,从整体趋势上而言,黄土抗拉强度 均随冻融循环次数的增加呈指数衰减,其中,冻融3 ~5次达到衰减程度的稳定值。含水量越大或者干 密度越小,冻融作用对其强度值的影响越小,但是对 其强度衰减率的影响越大。

(2) 黄土抗拉强度的衰减率随冻融循环次数的 增加呈指数衰减关系一般在 3 次冻融作用后强度衰 减率达到最大值。其中,含水量在 11%至 17%之间 时的最终强度衰减量均在 15%~30%之间,而含水 量 19%时的最终强度衰减量可达 50%,这说明高含 水量黄土的冻融衰减规律具有一定的特殊性。

(3) 在同时考虑黄土抗拉强度冻融规律普遍性 与特殊性的基础上,提出了适用于估算兰州黄土抗 拉强度的冻融衰减模型。

参考文献(References)

- [1] 乔平定.黄土地区工程地质[M].北京:水利电力出版社,1990.
 QIAO Pingding. Engineering geology in loess region[M].Beijing:Water Resources and Electric Power Press,1990.
- [2] 刘祖典.黄土力学与工程[M].西安:陕西科学技术出版社, 1997.

LIU Zudian. Mechanics and engineering of loess[M]. Xi´an: Shaanxi Science and Technology Press, 1997.

 [3] 武丹,巨玉文.冻融循环对黄土路基填料抗剪强度影响的实验 研究[J].中国科技论文,2017,12(1):118-120.
 WU Dan,JU Yuwen.Experimental study on the effect of freez-

ing and thawing cycles on shear strength of fillers for loess subgrade[J].China Sciencepaper,2017,12(1):118-120.

- [4] 董晓宏,张爱军,连江波,等.反复冻融下黄土抗剪强度劣化的 试验研究[J].冰川冻土,2010,32(4):767-772.
 DONG Xiaohong,ZHANG Aijun,LIAN Jiangbo, et al.Study of shear strength deterioration of loess under repeated freezingthawing cycles [J]. Journal of Glaciology and Geocryology,
- 2010,32(4):767-772.
 [5] 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.
 DONG Xiaohong,ZHANG Aijun,LIAN Jiangbo, et al.Laboratory study on shear strength deterioration of loess with long-term freezing-thawing cycles[J].Journal of Engineering Geology, 2010,18(6):887-893.
- [6] 胡再强,刘寅,李宏儒.冻融循环作用对黄土强度影响的试验研究[J].水利学报,2014,45(增刊2):14-18.
 HU Zaiqiang,LIU Yin,LI Hongru.Influence of freezing-thawing cycles on strength of loess[J].Journal of Hydraulic Engineering,2014,45(Suppl02):14-18.
- [7] 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. PANG Xuqing,HU Zaiqiang,LIU Yin.Experimental study on mechanics properties damage to the loess under the freeze-thaw cycle[J].Journal of Railway Science and Engineering, 2016,13(4):669-674.
- [8] 叶万军,杨更社,彭建兵,等.冻融循环导致洛川黄土边坡剥落 病害产生机制的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2012,31 (1):199-205.

YE Wanjun, YANG Gengshe, PENG Jianbing, et al. Test research on mechanism of freezing and thawing cycle resulting in loess slope spalling hazards in Luochuan[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(1):199-205.

[9] 刘慧,杨更社,叶万军,等.冻融循环条件下原状黄土强度损伤 试验研究[J].西安科技大学学报,2016,36(5):633-639. LIU Hui, YANG Gengshe, YE Wanjun, et al. Experimental study on strength damage of undisturbed loess under freezethaw cycles condition[J].Journal of Xian University of Science and Technology,2016,36(5):633-639.

[10] 杨更社,魏尧,田俊峰,等.冻融循环对结构性黄土构度指标影

响研究[J].西安科技大学学报,2015,35(6):675-681.

YANG Gengshe, WEI Yao, TIAN Junfeng, et al. Effect of the freeze-thaw cycles on structural loess structure index [J]. Journal of Xian University of Science and Technology, 2015, 35(6):675-681.

- [11] 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.
 XIAO Donghui, FENG Wenjie, ZHANG Ze. The changing rule of loess's porosity under freezing-thawing cycles[J].Journal of Glaciology and Geocryology,2014,36(4):907-912.
- [12] 张泽,周泓,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.
 ZHANG Ze,ZHOU Hong,QIN Qi,et al.Experimental study on porosity characteristics of loess under freezing-thawing cycle[J].Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2017,47(3):839-847.
- [13] 杨更社,田俊峰,叶万军.冻融循环对阳曲隧道黄土细观损伤 演化规律影响研究[J].西安科技大学学报,2014,34(6):635-640.

YANG Gengshe, TIAN Junfeng, YE Wanjun. Influence of freeze-thaw cycles on Yangqu tunnel loess meso-damage evolution[J].Journal of Xian University of Science and Technology,2014,34(6):635-640.

- [14] 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.
 NI Wankui, SHI Huaqiang. Influence of freezing-thawing cycles on micro-structure and shear strength of loess[J]. Journal of Glaciology and Geocryology,2014,36(4):922-927.
- [15] 田俊峰,叶万军,杨更社.含水量及冻融循环对阳曲黄土压缩 特性的影响分析[J].地下空间与工程学报,2015,11(4):933-939.

TIAN Junfeng, YE Wanjun, YANG Gengshe, Analysis on influence of moisture content and freeze-thaw cycle on compression characteristics of loess in Yangqu region, Shanxi Province[J].Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015, 11(4):933-939.

- [16] 谷琪,王家鼎,司冬冬,等.不同含水率下黄土冻融循环对湿陷 性影响探讨[J].岩土工程学报,2016,38(7):1187-1192.
 GU Qi, WANG Jiading, SI Dongdong, et al. Effect of freezethaw cycles on collapsibility of loess under different moisture contents[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016,38(7):1187-1192.
- [17] 叶万军,杨更社,常中华,等.黄土边坡剥落病害的发育特征及 其发育程度评价[J].工程地质学报,2011,19(1):37-42.
 YE Wanjun,YANG Gengshe,CHANG Zhonghua, et al.Characteristics of development state of spalling hazard in loess slope and its evaluation method[J].Journal of Engineering Geology,2011,19(1):37-42.
- [18] 程秀娟,张茂省,朱立峰,等.季节性冻融作用及其对斜坡土体 强度的影响:以甘肃永靖黑方台地区为例[J].地质通报, 2013,32(6):904-909.

(下转第1058页)