

DOI: 10.11779/CJGE201607023

一个考虑冻融循环作用的结构性能定量参数的试验研究

郑 邴^{1, 2}, 马 巍^{*1}, 李国玉¹, 穆彦虎¹, 彭 惠³

(1. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所 冻土工程国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 中交第一公路勘察设计研究院有限公司, 陕西 西安 710056)

摘 要: 土的结构性能可以从本质上揭示土体的工程性质和行为本质。冻融循环对土体结构性能有着非常重要的影响。在结构性能定量参数“综合结构势”的基础上, 增加考虑了冻融循环对土结构性能的影响, 提出了一个考虑冻融循环对土结构性能的影响作用的结构性能定量参数(简称冻融结构势)。并通过单轴压缩试验和单轴循环加卸载试验分别获得原状土、浸水饱和土及不同冻融循环次数下土样的单轴强度、失效应变、回弹模量和能量耗散, 对用不同参数表示的冻融结构势进行了对比和分析。并利用 CT 扫描试验获得了不同冻融循环次数下土样中间截面的 CT 数均值, 对冻融结构势进行了验证。认为不同参数表示的冻融结构势反映了土体结构性能的不同方面, 而用强度和能量耗散表示的冻融结构势能够较好地反映土结构性能随冻融循环次数的变化情况, 并提出在不同参数表示的冻融结构势之间的关系可能跟土质、加载方式等因素有关, 明确了下一步的研究方向。

关键词: 结构性能; 冻融循环; 定量参数

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2016)07-1339-06

作者简介: 郑 邴(1986-), 女, 博士研究生, 主要从事冻、融土结构性能方面的研究工作。E-mail: yunzheng@lzb.ac.cn。

Laboratory study on quantitative parameter of structural characteristics of soils considering effect of freeze-thaw cycles

ZHENG Yun^{1, 2}, MA Wei¹, LI Guo-yu¹, MU Yan-hu¹, PENG Hui³

(1. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese

Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. China

Communications Construction Company First Highway Consultants Co., Ltd., Xi'an 710056, China)

Abstract: The structural characteristics of soils can essentially reveal the fundamentals of geotechnical behaviors. The freeze-thaw cycles have very important effect on them. Based on the quantitative structural parameter, comprehensive structural potential (CSP) proposed by Xie Dingyi, a modified structural parameter, a comprehensive structure potential with consideration of freeze-thaw cycles (CSPFT), is proposed. The routine uniaxial compression and uniaxial loading-unloading compression tests are conducted to get the 4 indexes of uniaxial compression strength, failure strain, resilient modulus and energy dissipation, which are used to constitute the CSPFT. The differences between CSPFTs constituted from the 4 indexes are also discussed. CT scanning of soil samples under different cycles is conducted to analyze the reliability of CSPFT, and CSPFTs of strength and energy dissipation are better than those of the other two ones. The relationships between the CSPFTs of different parameters rely on the soil types, stress paths and other factors, which are worth for further discussion.

Key words: structural characteristic; freeze-thaw cycles; quantitative parameter

0 引 言

土的结构性能是 21 世纪土力学的核心问题^[1]。土体没有固定的变形模量和强度, 而是随着土体结构的变化表现出不同的物理力学特征。土体结构影响着土的强度、变形模量、渗透性等诸多工程性质^[2-5]。结构性能可以从本质上揭示土体在不同压力、温度等外界环境下的行为特征, 结构性能的研究对人们在工程实践中准确把握土性的变化有着重要的意义。

谢定义^[6]认为, 土结构性能研究的根本目的不在于看到土结构性能及其变化的形象, 而在于发现土结构性能及其变化的力学效果。他认为土的结构性能主要表现在

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(“973 计划”)项目(2012CB026106); 国家自然科学基金优秀国家重点实验室研究项目(41023003); 甘肃省科技重大专项计划项目(143GKDA007); 中科院西部之光重点项目

收稿日期: 2015-07-01

***通讯作者**

两个方面:①在未达到临界条件时,土体保持原有结构不被破坏的能力,即结构可稳性;②土体原有结构一旦被破坏,强度陡然降低和变形量急剧增加的能力,即结构可变性。由于结构性土既具有强的结构可稳性又具有强的结构可变性,因此可利用扰动、浸水和加荷破坏土的结构性,以结构性被破坏时的难易程度和被破坏后的变形程度,即结构势,来反映土体结构性的强弱程度和演变规律。并提出了一个一般土的结构性定量参数——“综合结构势”,他建议以原状土样与重塑土样在某一级压力 P 作用时的侧限压缩量之比 S_0/S_r 反映土颗粒的结构排列在外力作用下被破坏的难易程度和破坏后的变形程度,以浸水饱和土样与原状土样在压力 P 作用下的侧限压缩量之比 S_s/S_0 反映土颗粒之间的联结作用在浸水条件下被破坏的难易程度和破坏后的变形程度。将“综合结构势”定义为

$$m_p = \frac{S_s/S_0}{S_0/S_r}, \quad (1)$$

式中, S_r , S_s , S_0 分别是通过侧限压缩试验得到的重塑土、浸水饱和土和原状土在压力 P 下的压缩量。谢定义对“综合结构势”作为结构性参数进行了试验验证,并说明了综合结构势对土的变形具有较好的归一化作用,对具有不同粒度、密度、湿度的结构性土均有很好的稳定性。并能够反映土体在颗粒排列与颗粒联结两个方面受外界压力影响作用时的土结构性的综合特征。但是,冻融循环作为影响土体结构性的一个扰动因素,却没有在“综合结构势”中得到反映。

对寒区工程而言,昼夜温差和气候变化引起的温度正负波动严重影响了土体的工程性质,而这种影响的本质原因是由于土体结构性在冻融循环过程中,由于水分的不断迁移和相变而造成的。也就是说,冻融循环作为一种外界环境扰动的具体形式,对土体的结构性有着强烈的影响。研究表明,冻融循环对原状土的结构性具有显著弱化的作用,使土体的强度和模量降低^[7-8]。而对于重塑土,冻融循环则具有双重作用。正常固结土在冻融过程中被压密,使得模量与强度均有所增加,结构性得到强化^[9-10];而强超固结状态下的重塑土则与原状土类似,其结构性在冻融循环作用下发生弱化^[11]。齐吉琳等^[11]对超固结土在冻融循环下的表现进行了分析,认为冻融循环对土结构性的总效应取决于冻胀过程中冰晶生长对土颗粒联结的破坏,和有效应力增大对土进一步塑性压缩之间的对比关系。如果前者占优势,则总效应仍然显示出土结构的弱化;如果后者占优势,则可能发生与正常固结土相似的结构强化效应。此外,郑鄂等^[12-13]研究发现冻融循环对土颗粒、土孔隙的分布与排列均有不可忽略的影响,进一步揭示了冻融循环对结构性影响的细微观

机理。

人们已经普遍认识到冻融循环对土结构性的影响,但是,如何定量评价冻融循环对土体结构性的影响,一直是广大科技人员致力于解决的前沿性课题。本文拟在“综合结构势”的基础上,将冻融循环作用对土结构性的扰动考虑在内,提出一个能够反映冻融循环作用影响的结构性定量参数,以进一步探索冻融循环对土结构性影响的定量研究新方法。

1 冻融结构势

基于“综合结构势”用浸水饱和和破坏颗粒联结、用扰动重塑破坏颗粒排列以使结构势释放的思路进行拓展:重塑扰动使原状土的初始结构一次性完全破坏;而冻融循环扰动则是随着循环次数的增加,扰动程度不断增加的过程,当冻融循环次数达到一定的数量时,其对土体的初始结构将达到完全破坏的程度。因而,可以建立一个既能考虑冻融循环扰动的影响、又能反映结构性随扰动程度不断增加的演化规律的定量参数——冻融结构势,即通过试验分别得到原状土、浸水饱和土和经历 N 次冻融循环后土样的性质参数,

$$M_N^i = \frac{E_0^i}{E_{\text{sat}}^i} \cdot \frac{E_0^i}{E_N^i} = \bar{E}, \quad (2)$$

式中, E_0 为原状土参数, E_{sat} 为浸水饱和土参数, E_N 为 N 次冻融循环后土的参数。参数 E 不再局限为“综合结构势”中的侧限压缩变形量,而可以从其它方式的力学试验所得到的强度、失效应变、模量等,或者从微观试验和其它试验得到的任意一个可以反映三者差别的性质参数或指标,分别用上标 i 来进行区分。

随着冻融循环次数 N 的增加,土体原始结构逐渐破坏,次生结构逐渐形成。由式(2)可知,冻融结构势不仅可以通过 M_N^i 随冻融循环次数的变化来反映冻融循环对土体结构性的破坏过程;而且当冻融循环次数 N 趋于无限大时(或达到某一值时),还可以反映出土体结构完全破坏后土体的强度变形特征,即在一定情况下可以将综合结构势看作是冻融结构势在 N 趋于无穷大时的一种特殊情况。冻融结构势在综合结构势的基础上,增加考虑了土体受温度扰动的影响;并通过不同的冻融循环次数,达到反映土体结构性演化过程的目的。

但是,对于用不同参数表示的冻融结构势, M_N^i 的大小与变化趋势将会不可避免地存在差异,下面将通过单轴压缩试验和单轴循环加卸载试验分别得到原状土、浸水饱和土与不同冻融循环次数下土样的单轴强度、失效应变、回弹模量和能量耗散 4 个参数,并对其表示的结构性参数进行讨论。本文规定 $i=1, 2, 3$,

4 分别表示单轴抗压强度、失效应变、回弹模量和能量耗散, 那么, E_0^1 , E_{sat}^1 , E_N^1 就分别代表原状土、浸水饱和土和 N 次冻融循环土的单轴抗压强度, M_N^1 就是相应的结构性参数。并以此类推。

2 结构性参数的试验与分析

通过试验对冻融结构势作为结构性定量参数进行说明和对其可靠性进行检验时, 由于原状土样在采样过程中不可避免地会受到不确定的扰动, 对土样的初始固结度和初始状态均匀性影响很大, 会导致较大的试验误差。又因为如引言中所述, 超固结重塑土在冻融循环作用下的行为特征与原状土相似, 因此, 为了尽量确保样品初始状态的一致性, 本次试验特选用试验室制备的超固结重塑土样来代替原状土样。

2.1 试验过程

试验用土为西安白鹿塬黄土, 其颗粒组成与基本物理性质如表 1。将其自然风干后加蒸馏水拌和均匀, 配制成含水率为 19.2% 的土, 在密闭容器中静置 24 h 后, 按干密度为 1.78 g/cm³ 压制成直径为 39.1 mm、高度为 80 mm 的重塑土样。制作土样时, 每一个样品在压样时的最大压力均控制为 8 kN, 以确保同一批土样具有相同的初始超固结度。为了尽量保持样品初始状态的一致性, 试验所用的所有样品一次性压制完成。将土样分为 9 组, 对其中的 1 组不再施加任何的扰动和处理, 即: 既不做浸水饱和, 也不做冻融循环, 而是直接进行单轴压缩试验, 将其视为相对的“原状土样”; 对另外 1 组进行浸水饱和处理, 即将试样装入饱和器进行抽气饱和, 在真空度接近 1 个大气压的条件下先对试样抽真空 3 h, 然后保持真空度缓缓注入纯化水, 待试样被完全淹没后释放真空, 在水下静置浸泡 10 h 后取出进行单轴试验。而对另外的 7 组试样, 则首先放入可程式冻融循环箱内分别进行 1, 3, 5, 7, 10, 15, 20 次封闭条件下的冻融循环; 冻融循环过程中, 土样先用一层保鲜膜包裹密封以防止水分蒸发散失, 然后装入铜制模具中, 以防止土样在冻融过程中发生径向变形; 每一次冻融循环持续 8 h, 前 4 h 在 -20℃ 下使土样完全冻结, 后 4 h 在 20℃ 下使土样完全融化; 待特定次数的冻融循环完成后, 试样均处于完全融化状态, 再在常温下进行单轴试验。原状样、浸水饱和样、各次数下的冻融循环土样, 共 9 组试样准备完成后, 使用 GDS 数控试验机分别对其进行单轴压缩试验和单轴加卸载试验。加卸载均采用应变控制, 加卸载速率均为 1%/min, 即 0.8 mm/min。每组试验进行 2~3 次的平行试验, 当平行试验的重复度较好时, 取平行试验的平均值, 当重复试验的结果较为离

散时, 再补做一组试验, 取较为接近的两组的平均值进行分析研究。如图 1 是原状土样的单轴压缩 3 次平行试验 (图 1 (a)) 和单轴循环加卸载 3 次平行试验的应力应变曲线 (图 1 (b))。可以发现, 单轴压缩试验的 3 条曲线均比较接近, 即试验的重复性较好, 则原状土样的单轴压缩强度和失效应变取 3 次试验的平均值; 而在单轴循环加卸载试验中, 曲线 2 和曲线 3 的滞回环、峰值强度、失效应变等均比较接近, 而曲线 1 偏离较大, 则本次研究中只使用曲线 2 和曲线 3 的平均值来计算能量耗散和回弹模量。以下对浸水饱和和组的土样与各次冻融循环组的土样的数据均是如此处理。

表 1 西安黄土的颗粒组成情况

Table 1 Grain-size distribution of Xi'an loess

土样 名称	各粒组含量/%				塑限 /%	液限 /%
	<0.005 mm	0.005~ 0.01 mm	0.1~ 1 mm	>1 mm		
西安黄土	10.05	6.68	80.91	2.36	18.6	38.4

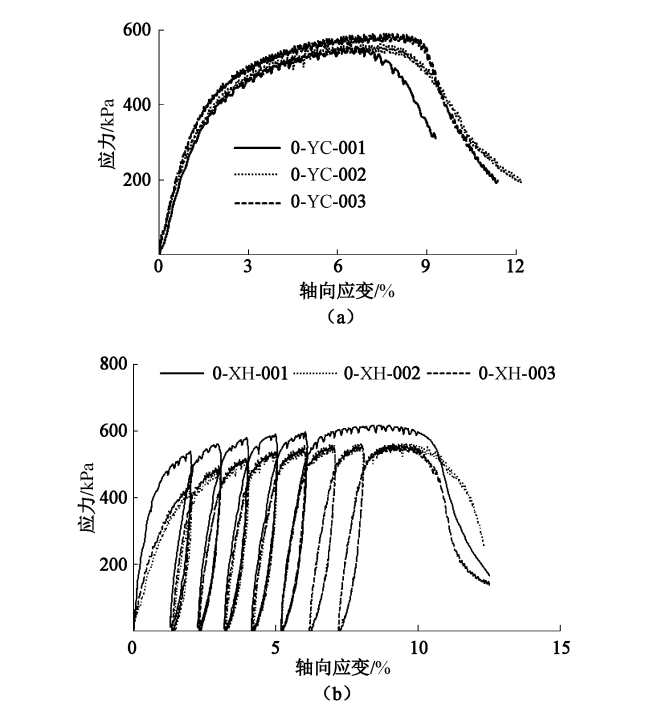


图 1 原状土单轴压缩和单轴加卸载的重复性试验曲线
Fig. 1 Parallel curves of uniaxial compression and uniaxial loading-unloading tests on initial samples

2.2 试验结果与分析

图 2 是原状土样与浸水饱和土样的单轴压缩曲线。由图 2 可知, 原状土样的压缩曲线具有明显的转折点。当轴向压力小于临界值时, 土样呈现出硬化现象, 土样强度随应变的增加而不断增加, 这是土样的结构强度在逐渐发挥作用的结果; 而一旦当轴向压力超过土体结构所能承受的最大强度, 即结构强度, 土样的强度便迅速丧失, 压缩性急剧增大, 土样迅速软

化,因而压缩曲线的后半段呈现陡降型。这是结构性土压缩曲线的典型特征。因而也证明,本文所利用的超固结重塑土样,虽然不同于天然原状土样,但在结构性方面,仍具有一定的代表性。同时,图 2 中显示浸水饱和土样的强度约为原状土强度的一半,当轴向应变较小时,强度先随轴向应变的增加而不断增加,而后,随着轴向应变继续增加,强度不再增加,而呈现出明显的塑性流动特性。强度降低说明结构可稳性降低,塑性流动说明结构可变性增大。另外,从图 2 中还可以发现,原状土的压缩曲线在强度转折点处的应变值,跟浸水饱和土在强度开始稳定时的应变值基本上相同,由此也能发现,对土样进行浸水饱和和处理对土颗粒排列的影响很小,但是对土颗粒之间的联结作用具有很强的破坏作用,从而影响土样的结构性。由于浸水饱和土样的单轴压缩曲线呈应变硬化型,按照惯例取 15%应变对应的应力为其强度值,相应地,失效应变取 15%。

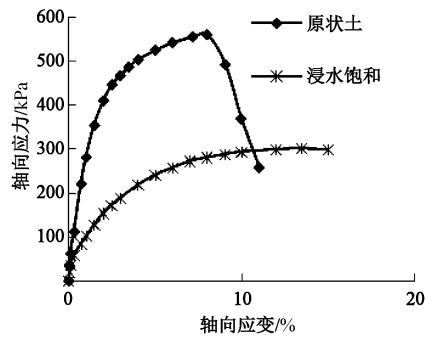


图 2 原状土与浸水饱和土的单轴压缩曲线

Fig. 2 Uniaxial compression curves of initial sample and waterlogged sample

表 2 中给出了这 9 组土样的平均单轴压缩强度和失效应变。将表 2 中不同冻融循环次数下的强度和失效应变代入式 (2),便得到相应的冻融结构势随冻融循环次数的变化曲线。图 3 是由强度和失效应变表示的冻融结构势 M_N^1 和 M_N^2 。由图可以发现,由强度和失效应变表示的冻融结构势不仅在数值上不尽相同,而且其随冻融循环次数的变化趋势也并不完全相同。由强度表示的冻融结构势,其数值越大,说明土样结构越容易被破坏;由失效应变表示的冻融结构势,其数值越大,说明土样在越小的变形程度下就会发生结构破坏。 M_N^1 总体是 M_N^2 的 2~3 倍, M_N^1 在 3 次冻融循环之前先增大,然后在 5~10 次循环时减小,最后在 15~20 次时略有回升,并稳定在一定水平。说明前 3 次冻融循环对土样的结构产生明显的弱化作用,而 5~10 次循环又使土样结构得到略微的强化,而 15 次循环后,土体结构保持稳定。而 M_N^2 随冻融循环次数的变化趋势近似呈一条接近水平的斜直线,即 M_N^2 呈

线性稍有增加,则说明不同冻融循环次数下的土样,其结构发生破坏时的变形程度略有减小,但差别不大。

表 2 各组试样的单轴压缩强度和失效应变

Table 2 Uniaxial compression strengths and failure strains of various groups of samples

样品名称	失效应变/%	强度/kPa
原状样	8.0	560
浸水饱和样	15.0	301
1 次冻融样	6.5	295
3 次冻融样	5.2	231
5 次冻融样	4.6	399
7 次冻融样	4.6	359
10 次冻融样	4.8	375
15 次冻融样	4.3	283
20 次冻融样	4.5	300

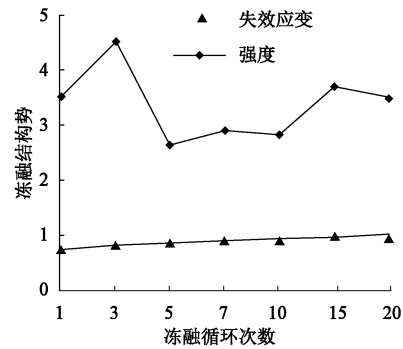


图 3 由强度和失效应变表示的冻融结构势

Fig. 3 CSPFTs of uniaxial compression strength and failure strain

强度反映土体结构破坏的难易程度,而失效应变则反映土体结构破坏时的变形程度,强度和失效应变分别反映了土体结构性的两个方面,其各自的变化规律也说明了土体结构性在这两个方面的演化规律,而土体的结构性是由两者的综合效果最终决定。能综合反映强度和变形特征的两个常用参数是模量和能量:模量是应力与应变之比,能量是应力与应变之积。因而,通过单轴加卸载试验得到各组样品在加卸载过程中的回弹模量和能量耗散,构造相应的冻融结构势,对不同冻融循环土样的结构性进行综合分析。单轴加卸载试验曲线上,滞回环的斜率即为回弹模量,滞回环的面积则是能量耗散。表 3 给出了由单轴加卸载试验得到的经历不同冻融循环次数土样的平均回弹模量和能量耗散。同样,将表 3 中不同冻融循环次数下的平均回弹模量和能量耗散值分别代入式 (2),得到相应的冻融结构势 M_N^3 , M_N^4 随冻融循环次数的变化曲线如图 4 所示。由图 4 可知,由回弹模量表示的冻融结构势 M_N^3 随冻融循环次数的变化不明显,而由能量耗散表示的冻融结构势 M_N^4 随冻融次数的变化趋势与

用强度表示的冻融结构势 M_N^1 大体相似, 均在第 3 次冻融循环时达到最大值, 这也说明在第 3 次冻融循环后, 土样的结构性得到最大程度的破坏, 而 5~7 次循环则会引起稍微的结构强化, 而后趋于稳定。

由此可见, 本次研究所选取的 4 个参数中, 用单轴强度和能量耗散表示的冻融结构势能够较好地反映出土样结构性随冻融循环次数的变化情况。而失效应变和回弹模量所表示的冻融结构势随冻融循环次数的变化不大。但是, 用强度和能量耗散表示的冻融结构势虽然变化趋势一致, 但数值上差别却较大, 这是由于能量耗散考虑了变形效应的原因。

表 3 各组试样的平均回弹模量和能量耗散

Table 3 Uniaxial compression strengths and failure strains of various groups of samples		
样品名称	平均能量耗散/(J·m ⁻³)	平均回弹模量/MPa
原状样	996	58.0
浸水饱和样	245	40.1
1 次冻融样	349	44.9
3 次冻融样	179	43.3
5 次冻融样	379	45.5
7 次冻融样	404	43.9
10 次冻融样	279	41.8
15 次冻融样	372	46.2
20 次冻融样	330	44.5

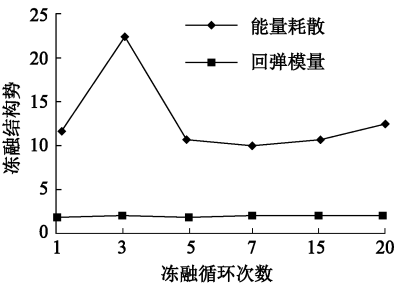


图 4 由回弹模量和能量耗散表示的冻融结构势
Fig. 4 CSPFTs of energy dissipation and resilient modulus

3 冻融结构势的可靠性论证

综上, 冻融结构势反映了土的结构性随冻融循环次数的变化规律, 不同参数表示的冻融结构势反映了土结构性的不同方面。

而土体结构性的改变, 归根结底, 是土体内部结构的改变所引起的, 是土颗粒和土孔隙的大小、形状、位置等重新分布和排列的结果。CT 数可以定量描述土样的被测截面上的密度分布, 从而反映土颗粒和土孔隙在冻融前后的分布变化, 是试验室观测土体细微观结构的有效手段。为了探究土体结构性变化的细微观本质, 本次研究对不同冻融循环次数下的土样进行

了 CT 扫描, 并用 CT 数均值对本文提出的冻融结构势进行了验证。试验扫描用的 CT 设备为中科院寒旱所冻土工程国家重点实验室所引进的医用飞利浦 Brilliance 16 螺旋 CT 系统, 该 CT 系统的空间分辨率为 0.208 mm, 密度分辨率为 0.3%。本次试验所采用的扫描电压为 90 kV, 扫描电流为 327 mA。

图 5 是不同冻融循环次数下土样中间截面的 CT 数均值。由图 5 可知, 土样的 CT 数在前 3 次冻融循环中急剧减小, 第 3 次达到最小, 说明前 3 次冻融循环使土样的密度减小, 产生了结构弱化作用; 而 5 次冻融循环后, 随着冻融循环次数的增加, CT 数略有回升, 7 次循环后基本上保持稳定, 说明 5~7 次冻融循环后土样的结构稍有强化, 而后逐渐趋于稳定。这与用能量表示的冻融结构势所反映的土样在冻融循环作用下结构性的变化规律是一致的。CT 数从微观的角度证明了冻融结构势在描述土体结构性受冻融循环影响的可行性。

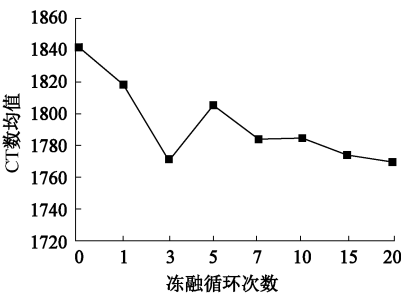


图 5 不同冻融循环次数土样中间截面的 CT 数均值
Fig. 5 Average CT values with increasing cycles

4 结 论

本文在“综合结构势”的基础上, 构造了一个可以考虑冻融循环对土结构性影响的结构性定量参数“冻融结构势”。并通过单轴压缩试验和单轴循环加卸载试验, 对用不同参数表示的冻融结构势进行了分析和比较, 通过 CT 扫描试验验证, 认为不同参数表示的冻融结构势反映了土体结构性的不同方面; 而用强度和能量耗散表示的冻融结构势比用失效应变和回弹模量表示的冻融结构势能更好地说明土的结构性随冻融循环次数的变化情况。作为对结构性定量参数的初步探索, 也还存在着以下 2 个主要问题有待于进一步研究:

- (1) 应进一步探索不同参数表示的冻融结构势之间的关系以及是否受到土质、加载方式等因素的影响, 探讨冻融结构势的普适性。
- (2) 对于用超固结重塑土得到的试验结果, 在一定程度上可以反映原状土的一些性质, 但不可否认, 必将也存在着一定程度的差异, 进一步探索这些差异

及其两者之间的关系对指导工程实践有着非常重要的意义。

参考文献:

- [1] 沈珠江. 软土工程特性和软土地基设计[J]. 岩土工程学报, 1998, **20**(1): 100 - 111. (SHEN Zhu-jiang. Engineering properties of soft soils and design of soft ground[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, **20**(1): 100 - 111. (in Chinese))
- [2] 刘恩龙, 沈珠江, 范文. 结构性粘土研究进展[J]. 岩土力学, 2005, **26**(增刊 1): 1 - 8. (LIU En-long, SHEN Zhu-jiang, fAN Wen. Advance in researches on structured clay[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, **26**(S1): 1 - 8. (in Chinese))
- [3] 吕海波, 汪稔, 赵艳林, 等. 软土结构性破损的孔径分布试验研究[J]. 岩土力学, 2003, **24**(4): 573 - 578. (LÜ Hai-bo, WANG Ren, ZHAO Yan-lin, et al. Study of structure characteristics evolution of soft clay by pore size distribution test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, **24**(4): 573 - 578. (in Chinese))
- [4] 马巍, 吴紫汪, 常小晓. 固结过程对冻土应力 - 应变特性的影响[J]. 岩土力学, 2000, **21**(3): 198 - 200. (MA Wei, WU Zi-wang, CHANG Xiao-xiao. Effects of consolidation process on stress-strain characters of frozen soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2000, **21**(3): 198 - 200. (in Chinese))
- [5] 赵淑萍, 马巍, 郑剑锋, 等. 不同温度条件下冻结兰州黄土单轴试验的 CT 实时动态监测[J]. 岩土力学, 2010, **31**(增刊 2): 92 - 97. (ZHAO Shu-ping, MA Wei, ZHENG Jian-feng, et al. CT real-time monitoring on frozen Lanzhou loess at different temperatures and under uniaxial loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(S2): 92 - 97. (in Chinese))
- [6] 谢定义, 齐吉琳. 土结构性及其定量化参数研究的新途径[J]. 岩土工程学报, 1999, **21**(6): 651 - 656. (XIE Ding-yi, QI Ji-lin. Soil structure characteristics and new approach in research on its quantitative parameter[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, **21**(6): 651 - 656. (in Chinese))
- [7] GRAHAM J, AU V C S. Effects of freeze-thaw and softening on a natural clay at low stresses[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1985, **22**(1): 69 - 78.
- [8] LEROUÉIL S, TARDIF J, ROY M, et al. Effects of frost on the mechanical behavior of champlain sea clays[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1991, **28**(5): 690 - 697.
- [9] VIKLANDER P. Permeability and volume changes in till due to cyclic freeze-thaw[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1998, **35**(3): 471 - 477.
- [10] ALKIRE B D, MORRISON J M. Change in soil structure due to freeze-thaw and repeated loading[J]. Transportation Research Record, 1983, **918**: 15 - 21.
- [11] 齐吉琳, 马巍. 冻融作用对超固结土强度的影响[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(12): 2082 - 2086. (QI Ji-lin, MA Wei. Influence of freezing-thawing on strength of overconsolidated soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(12): 2082 - 2086. (in Chinese))
- [12] 郑郢, 马巍, 郗慧. 冻融循环对土结构性影响的机理与定量研究方法[J]. 冰川冻土, 2015, **37**(1): 132 - 137. (ZHENG Yun, MA Wei, BING Hui. Impact of freezing and thawing cycles on the structures of soil and a quantitative approach[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2015, **37**(1): 132 - 137. (in Chinese))
- [13] 郑郢, 马巍, 郗慧. 冻融循环对土结构性影响的试验研究及影响机制分析[J]. 岩土力学, 2015, **36**(5): 1282 - 1287. (ZHENG Yun, MA Wei, BING Hui. Impact of freezing and thawing cycles on structure of soils and its mechanism analysis by laboratory testing[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, **36**(5): 1282 - 1287. (in Chinese))