

分类号：
学号：20232010005

密级：
单位代码：10759

石河子大学

硕士学位论文



冻融循环条件下伊犁结构性黄土力学特性及劣 化机制研究

学位申请人	白渝祥
指导教师	刘星炎 副教授
申请学位类别	工学硕士
专业名称	土木工程
研究领域	岩土工程
所在学院	水利建筑工程学院

中国·新疆·石河子

2026年05月

分类号：
学号：20232010005

密级：
单位代码：10759

石河子大学

硕士学位论文



冻融循环条件下伊犁结构性黄土力学特性及劣 化机制研究

学位申请人	白渝祥
指导教师	刘星炎 副教授
申请学位类别	工学硕士
专业名称	土木工程
研究领域	岩土工程
所在学院	水利建筑工程学院

中国·新疆·石河子

2026年05月

**A Study on the Mechanical Properties and Deterioration Mechanisms
of Structural Loess in Yili under Freeze-Thaw Cycles**

A Dissertation Submitted to

Shihezi University

In Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master of Engineering

By

Bai Yuxiang

(Civil Engineering)

Dissertation Supervisor: Prof. Liu Xingyan

May, 2026

石河子大学学位论文独创性声明及使用授权声明

学位论文独创性声明

本人所呈交的学位论文是在我导师的指导下进行的研究工作及取得的研究成果。据我所知，除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含其他个人已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中作了明确的说明并表示谢意。

研究生签名：白渝祥 时间：2026年5月20日

使用授权声明

本人完全了解石河子大学有关保留、使用学位论文的规定，学校有权保留学位论文并向国家主管部门或指定机构送交论文的电子版和纸质版。有权将学位论文在学校图书馆保存并允许被查阅。有权自行或许可他人将学位论文编入有关数据库提供检索服务。有权将学位论文的标题和摘要汇编出版。保密的学位论文在解密后适用本规定。

研究生签名：白渝祥 时间：2026年5月20日

导师签名：刘墨英 时间：2026年5月20日

摘要

新疆伊犁河谷地区是我国西北重要的季冻区，拥有独特且复杂的地质环境，对工程建设构成严峻挑战。在自然气候因素作用下，尤其是反复的冻融循环，引发了强烈的工程地质效应。在冻结期，温度梯度驱动地下水分向上迁移，在表层黄土中产生冻胀，增加了浅层土体的自重，还降低了其渗透性。融雪期，一方面水分难以有效下渗，另一方面通过被冻融劣化增大的渗透通道快速下渗，使底部黄土显著增湿软化，强度急剧降低。因此造成浅层黄土滑坡以及路基拱胀、路面开裂、不均匀沉降、翻浆和塌陷等病害。因此，在伊犁地区进行工程建设，尤其是高等级公路、铁路的路基、边坡和地基处理，必须高度重视季节性冻融循环这种环境因素对浅层土的影响。

本文以伊犁则克台地区的黄土为研究对象，通过开展了湿—密—冻融循环下的不固结不排水三轴试验，揭示了三种因素下土体的强度劣化和高度变化。提出并验证了新型制样方法的可行性和合理性。通过开展固结排水三轴试验，分析了不同约束状态下原状土和重塑土的应力应变曲线，体变应变曲线，强度参数和表面劣化的变化规律，并提出冻融循环下土体的结构性参数。通过开展 SEM 试验，对比分析了原状土和重塑土的内部结构，佐证了试验研究的可靠性。提出了符合该地区冻融循环后土体强度的损伤本构模型。主要研究工作及结论如下：

1.通过人工制备冻融循环下无上部约束的试样，提出了一种提供土体变形的新型制样方法。通过 UU 试验，分析了伊犁结构性黄土的力学特性和表面劣化。浅层伊犁黄土强度随冻融循环次数增加而降低，但在含水率 20.25%时略有上升。含水率对土壤强度的影响最为显著，其次为干密度。当含水量与干密度较低时，应力—应变曲线由软化转为硬化所需冻融循环次数较少；高含水量条件下曲线全程呈硬化趋势。当归一化强度 K 小于 0.5 时，土壤应变曲线硬化；当 K 大于 0.5 时，土壤应变曲线软化。在冻融作用下，未饱和和浅层伊犁黄土的高度在低含水量和接近最优含水率时变化甚微。在特定干密度下，高度变化呈现动态现象：先增后减再增。提出了考虑初始含水率、干密度及冻融循环次数的损伤系数综合。建立的耦合损伤本构模型同时满足上述三项因素并能够适用于结构性黄土。该模型能较准确预测湿—密—冻融条件下伊犁浅层黄土应力—应变曲线的变化以及结构性黄土的应力—应变曲线的变化。

2.通过人工制备冻融循环下无上部约束的饱和试样进行 CD 试验，对比分析了原状土和重塑土力学特性，并以此得出土体在冻融循环条件的结构性参数变化规律，同时通过新型制样方式能够清晰的观测饱和土体在经历冻融循环后表面劣化的规律。完全约束冻融循环条件下土体的强度大于无上部约束冻融下土体的强度。土体在冻融循环前，体变随应变出现先增后减的现象，即土体在荷载作用下先发生剪胀后发生剪缩。在冻融循环后土体的体变随应变增大出现持续增长的现象，即剪缩。随着冻融循环的增大，原状土和重塑土的黏聚力和内摩擦角都逐渐降低。完全约束冻融循环下原状

土和重塑土的黏聚力和内摩擦角大于上部无约束的原状土和重塑土。冻融循环下完全约束的土体结构性参数远小于上部无约束的土体，随着冻融循环次数的增加，差距变大。随着冻融循环次数的增加，土体表面的劣化逐渐加剧。土体表面孔隙数量增多，孔隙大小增大。没有上部约束的土体孔隙数量，和孔隙大小都大于完全约束的土体。当土体的黏聚力和内摩擦角低于某一个值时，土体表面开始出现劣化，当这个值进一步降低到某一个值时，冻融循环对土体的影响由上部扩展到下部。

3.通过 SEM 试验，分析了冻融循环下两种约束方式的微观结构变化规律。5mm 处的土体内部结构都以大颗粒和大孔隙为主，胶结结构较多。土样在 40mm 处的土颗粒大小相较于 75mm 处减小，孔隙数量相较于 75mm 增多，胶结结构减少。土样在 5mm 处受冻融作用最大，土体中的大颗粒在冻胀力的作用下破碎为小颗粒，出现大量小孔隙。随冻融循环次数增加，土体内部颗粒大小逐渐减小，胶结结构减少，孔隙数量增多，孔隙增大。冻融循环下完全约束的土体内部颗粒都大于无上部约束的土体，孔隙大小小于无上部约束的土体，孔隙数量也相对较小。冻融循环作用对土体内部的破坏程度小于无上部约束的土体，无上部约束的土体结构性更强。

关键词：黄土；力学特性；结构性参数；微观结构；本构模型

Abstract

The Ili River Valley region in Xinjiang constitutes a significant permafrost zone in northwest China, presenting a unique and complex geological environment that poses formidable challenges to engineering construction. Under the influence of natural climatic factors, particularly the repeated freeze-thaw cycles, pronounced engineering geological effects are induced. During the freezing period, temperature gradients drive groundwater migration upwards, causing frost heave in the surface loess. This increases the self-weight of shallow soils while simultaneously reducing their permeability. During the thaw period, water finds it difficult to infiltrate effectively. Simultaneously, it rapidly percolates through enlarged permeable pathways created by freeze-thaw degradation, significantly increasing moisture content and softening the underlying loess. This leads to a sharp reduction in strength, causing shallow loess landslides and engineering defects such as embankment heaving, pavement cracking, differential settlement, frost heave, and subsidence. Consequently, engineering projects in the Ili region particularly for high-grade highways and railways involving subgrade, slope, and foundation treatment must accord paramount importance to the impact of seasonal freeze-thaw cycles on shallow soils.

This study examines loess from the Zeketai area of Ili. Through conducting non-consolidated, undrained triaxial tests under wet-dense-freeze-thaw cycles, it reveals strength degradation and height variations in soil under these three factors. A novel sampling methodology was proposed and validated for its feasibility and rationality. Consolidated drained triaxial tests analysed stress-strain curves, volume-strain curves, strength parameters, and surface degradation patterns of undisturbed and remoulded soils under varying confinement conditions, establishing structural parameters for freeze-thaw-cycled soils. Through SEM investigations, comparative analysis of the internal structures of undisturbed and remoulded soils was conducted, corroborating the reliability of the experimental research. A damage constitutive model consistent with the strength behaviour of soils subjected to freeze-thaw cycles in this region was proposed. The principal research work and conclusions are as follows:

1. A novel specimen preparation method for inducing soil deformation was proposed by manually preparing specimens without upper confinement under freeze-thaw cycles. The mechanical properties and surface degradation of Yili structural loess were analysed through UU tests. The strength of shallow Yili loess decreased with increasing freeze-thaw cycles, though it showed a slight increase at a moisture content of 20.25%. Moisture content exerted the most significant influence on soil strength, followed by dry density. At low moisture and dry density conditions, fewer freeze-thaw cycles were required for the stress-strain curve to transition from softening to hardening; under high moisture conditions, the curve exhibited a consistent hardening trend throughout. When the normalised strength K was less than 0.5, the soil strain curve hardened;

when K exceeded 0.5, the soil strain curve softened. Under freeze-thaw action, the height of unsaturated shallow Ili loess exhibits minimal variation at low moisture contents and near optimal moisture content. At specific dry densities, height changes follow a dynamic pattern: increasing, then decreasing, then increasing again. A comprehensive damage coefficient incorporating initial moisture content, dry density, and freeze-thaw cycle count is proposed. The coupled damage constitutive model developed satisfies all three of the above criteria and is applicable to structural loess. This model can accurately predict changes in the stress - strain curves of shallow loess in the Ili region, as well as those of structural loess, under wet, dense and freeze-thaw conditions.

2. Through conducting CD tests on artificially prepared saturated specimens subjected to freeze-thaw cycles without upper confinement, a comparative analysis was performed on the mechanical properties of undisturbed and remoulded soils. This yielded the variation patterns of structural parameters in soil under freeze-thaw cycling conditions. Concurrently, the novel specimen preparation method enabled clear observation of surface degradation patterns in saturated soils following freeze-thaw cycles. Soil strength under fully confined freeze-thaw cycles exceeds that under unconstrained freeze-thaw conditions. Prior to freeze-thaw cycles, soil volumetric change exhibits an initial increase followed by decrease with strain, indicating shear expansion followed by shear contraction under loading. Post-cycle, volumetric change increases continuously with strain, reflecting sustained shear contraction. With increasing freeze-thaw cycles, both cohesion and internal friction angle decrease progressively in both undisturbed and remoulded soils. Under fully constrained freeze-thaw cycles, cohesion and internal friction angle are higher in both undisturbed and remoulded soils than in their unconstrained counterparts. Structural parameters of fully constrained soils under freeze-thaw cycles are significantly lower than those of unconstrained soils, with this disparity widening as cycle numbers increase. As the number of freeze-thaw cycles increases, surface degradation of the soil gradually intensifies. The number of surface pores increases, and pore size expands. The number of pores and pore size in unconstrained soil are both greater than those in fully constrained soil. When the cohesion and internal friction angle of the soil fall below a certain threshold, surface degradation begins. Upon further reduction to another threshold, the effects of freeze-thaw cycles propagate from the upper to the lower soil layers.

3. Through SEM testing, the microstructural changes under freeze-thaw cycles for both confinement methods were analysed. At the 5mm depth, the internal structure of the soil samples predominantly featured large particles and large voids, with a significant amount of cemented structure. At the 40mm depth, soil particle size decreased compared to the 75mm depth, while the number of voids increased relative to the 75mm depth, and cemented structure diminished. The 5mm section of the soil sample experienced the most pronounced freeze-thaw effects. Under the action of frost heave forces, the large particles within the soil

fractured into smaller particles, resulting in the formation of numerous small pores. With increasing freeze-thaw cycles, particle size within the soil gradually diminishes, cemented structures decrease, pore count increases, and pore size expands. Under freeze-thaw cycles, fully confined soil contains larger internal particles than unconstrained soil, smaller pore sizes, and relatively fewer pores. The degree of internal damage caused by freeze-thaw cycles is less than in unconstrained soil, which exhibits stronger structural integrity.

Key words: Loess; mechanical properties; structural parameters; microstructure; constitutive model

目录

第 1 章 绪论.....	1
1.1 选题背景与研究意义.....	1
1.2 黄土的力学特性及研究现状.....	3
1.3 黄土的结构性参数研究现状.....	4
1.4 黄土的本构模型研究现状.....	8
1.5 主要研究思路和内容.....	9
第 2 章 试验材料及试验方法.....	12
2.1 试验材料.....	12
2.1.1 取样概况.....	12
2.1.2 土样物理性质.....	13
2.2 试样制备.....	15
2.2.1 UU 试验样品制备.....	15
2.2.2 CD 试验样品制备.....	16
2.3 试验方法.....	17
2.3.1 冻融循环试验.....	17
2.3.2 UU 三轴试验.....	17
2.3.3 CD 试验.....	18
2.3.4 SEM 试验.....	18
2.4 本章小结.....	19
第 3 章 湿—密—冻融循环下伊犁黄土的力学特性.....	20
3.1 湿—密—冻融循环下重塑土的力学特性.....	20
3.1.1 初始含水率和干密度的影响.....	20
3.1.2 湿—密条件下冻融作用对土体的影响.....	24
3.1.3 湿-密条件下冻融作用对峰值强度的影响.....	25
3.2 冻融循环对土体高度的影响及表面劣化的影响.....	29
3.2.1 冻融循环对重塑土的高度影响.....	29
3.2.2 冻融循环下重塑土的表面劣化.....	30
3.3 本章小结.....	31
第 4 章 伊犁黄土的结构性和微观机理.....	32

4.1 犁黄土的结构性.....	32
4.1.1 原状样和重塑样力学特性.....	32
4.1.2 原状土和重塑土的应力应变曲线变化规律.....	32
4.1.3 原状土和重塑土的体变应变曲线变化规律.....	37
4.2 强度参数和结构参数的变化.....	40
4.2.1 土体的强度参数.....	40
4.2.2 冻融循环下土体的结构性参数.....	41
4.2.3 冻融循环下不同约束状态下土体表面劣化.....	44
4.2.4 SEM 图像分析.....	46
4.3 本章小结.....	49
第 5 章 损伤本构模型研究.....	50
5.1 本构模型的建立与参数研究.....	50
5.2 模型的建立.....	50
5.3 模型验证.....	56
5.4 本章小结.....	63
第 6 章 结论、创新点与展望.....	64
6.1 试验结论.....	64
6.2 创新点.....	65
6.3 展望.....	66
参考文献.....	67
致谢.....	76
作者简介.....	78

第1章 绪论

1.1 选题背景与研究意义

黄土是一种颜色呈灰黄或棕黄的第四纪沉积物，广泛分布于全球半干旱与干旱地区，覆盖了约 9.3% 的大陆面积，总分布面积约为 1300 万 km^2 [1-3]。其主要分布国家包括中国、俄罗斯、美国、英国、法国、德国、意大利、以色列、新西兰等。黄土与黄土状土在工程地质上属于特殊土，具有大孔隙、弱胶结、垂直节理发育和湿陷性等特征 [4]。我国黄土分布广泛、厚度变化显著、地貌类型多样，广泛覆盖于丘陵、山地、平原和高原之上，厚度一般为 5~200 m，总面积约 63.5 万 km^2 ，约占我国国土面积的 6.3%。

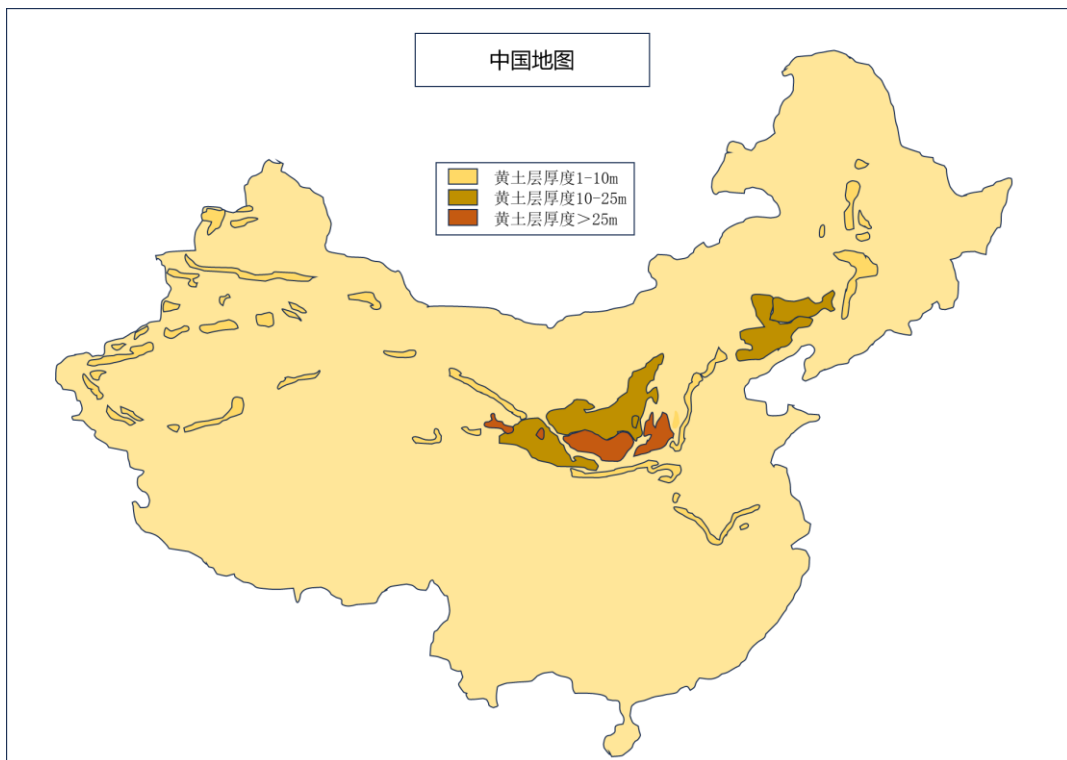


图 1-1 中国黄土分布图

Figure 1-1 Distribution Map of Loess in China

其中，新疆黄土属于典型的内陆型黄土，主要分布在天山、昆仑山、阿尔泰山等山系的麓坡地带、山间盆地以及河流的高阶地之上。在空间分布上，新疆黄土表现出显著的垂直地带性 [5]，多呈不连续带状覆盖于海拔 1000 米至 3000 米的中低山区，随海拔升

高厚度逐渐减薄、粒度变细。厚度方面变化较大，一般在几米至几十米之间，局部山前坳陷或背风坡地带可达百米以上，常披覆于基岩剥蚀面、山前倾斜平原和古冰水堆积物之上。从物质来源看，新疆黄土主要源自塔克拉玛干和古尔班通古特沙漠以及山前冲洪积物，经风力分选堆积而成，因此粒度上常表现为粗粉砂含量高、分选性相对较差的特点^[6]。在结构特性上，新疆黄土多属晚更新世至全新世堆积，结构疏松、大孔隙发育，表现出弱至中等的湿陷性，但湿陷系数通常低于黄土高原的典型黄土^[7,8]。同时，由于干旱少雨、蒸发强烈，黄土中富含易溶盐和中溶盐，如硫酸盐和氯盐，这些盐分在干燥状态下起胶结作用，使土体具有一定强度，但遇水后盐分溶解，强度迅速下降，易产生盐胀和溶陷等工程病害^[9-11]。尽管新疆黄土垂直节理较为发育，常形成陡坎和直立边坡，但其钙质胶结程度较弱，砂粒含量较高，整体结构性较黄土高原黄土差，抗冲刷和抗侵蚀能力偏弱。

此外，受沉积环境和气候波动影响，新疆伊犁河谷地区是我国西北重要的季冻区，拥有独特且复杂的地质环境，对工程建设构成严峻挑战^[8]。在自然气候因素作用下，尤其是反复的冻融循环，引发了强烈的工程地质效应^[12,13]。在冻结期，温度梯度驱动地下水向上迁移，在表层黄土中产生冻胀，增加了浅层土体的自重，还降低了其渗透性^[14]。融雪期，一方面水分难以有效下渗，另一方面通过被冻融劣化增大的渗透通道快速下渗，使底部黄土显著增湿软化，强度急剧降低。因此造成浅层黄土滑坡以及路基拱胀、路面开裂、不均匀沉降、翻浆和塌陷等病害^[8]。因此，在伊犁地区进行工程建设，尤其是高等级公路、铁路的路基、边坡和地基处理，必须高度重视季节性冻融循环这种环境因素对黄土的影响^[15,16]。



图 1-2 新疆伊犁地区黄土分布略图

Figure 1-2 Schematic Map of Loess Distribution in the Ili Region of Xinjiang

土体的结构特征对其宏观力学响应具有决定性作用。为服务于新疆黄土分布区工程

建设与地质灾害防控的实际需求，亟需系统开展黄土结构特性的精细化研究。受其特定生成环境控制，黄土中发育有独特的架空孔隙和骨架结构体系，并伴随垂直节理较为发育；在长期物理化学作用下，粒间逐渐形成胶结性联结^[17-19]。上述结构特征及物质组构共同塑造了黄土特有的结构性行为：在天然干燥状态下，其通常呈现较高强度，但在浸水条件下结构迅速失稳并发生湿陷变形，进而诱发地面塌陷、地基不均匀沉降及滑坡等典型工程病害与地质灾害^[20-23]。大量研究及工程实践证实，黄土地区一系列工程地质问题的本质成因，往往可追溯至其内在的结构特性。因此，深入探明黄土结构性的演化机制，具有重要理论意义与工程实用价值。

土的宏观结构一般涉及颗粒组成、空间排列、粒间接触模式及其相互作用力。从力学视角看，土的结构性体现为在外力扰动下维持其原始构型的能力，其核心机理在于粒间联结的逐步丧失，从而导致结构单元体重新排列，并引发孔隙形态、尺度、数量及分布特征的演变^[24,25]。结构性是土体物理力学性质体系中的重要组成部分，其强弱直接影响土体的承载性能，而其结构形态则进一步控制着变形与稳定性特征。系统分析黄土在受力变形过程中的结构性演化规律，有助于揭示结构性与宏观力学行为之间的内在耦合机制，为黄土地区工程建设安全及灾害防控提供理论支撑，对促进该区域工程活动与可持续发展协同推进具有重要意义。

1.2 黄土的力学特性及研究现状

学者们对黄土的力学特性的研究主要通过压缩，剪切，固结等试验进行，多集中于研究含水率、干密度、土壤质地以及粒度级配等因素，讨论了各因素的相互作用以及相应的应力-应变关系。

众多学者采用侧限压缩试验对黄土的压缩特性及其影响因素开展了系统性研究。胡再强等^[26]通过对比原状黄土与人工制备黄土的压缩行为，揭示了非饱和黄土在压缩过程中所表现的结构特性及其力学效应。张少宏等^[27]指出，非饱和压实黄土的压缩变形系数随含水率升高而增大，随干密度增大而减小。Guo等^[28]进一步发现，塑性压缩系数随含水率升高而增大、随干密度增大而减小，而结构屈服应力的变化规律则相反。罗爱忠等^[29]通过对不同初始含水率原状黄土开展压缩试验，建立了初始含水率与结构屈服应力之间的幂函数关系。张玉伟等^[30]将湿陷性黄土的压缩曲线划分为弹性变形与弹塑性变形两个阶段，认为拐点对应于土体的结构强度，且结构强度随含水率降低而升高。在增湿条件下黄土的湿陷变形特性方面，刘保健等^[31]和张茂花等^[32]分别采用单线法与双线法开展了不同初始含水率下的侧限压缩试验，通过拟合湿陷系数或割线模量与含水率、荷载水平之间的关系，探讨了增湿过程中的湿陷变形演化规律。高英等^[33]分析了不同埋深黄土

在增湿条件下的压缩与湿陷变形特征。陈存礼等^[34]探讨了黄土增湿变形与荷载及含水率之间的内在联系，并提出了湿陷系数的经验计算方法。

此外，部分学者致力于结构性参数的定量描述与模型构建。邵生俊等^[35]综合考虑加载与增湿条件下切线模量的变化，引入损伤参数建立了黄土地基沉降计算模型。上述研究从不同角度深化了对黄土压缩性、湿陷性及其结构演化规律的认识，为黄土工程实践提供了理论依据。在此基础上，学者们通过给土体施加环境因素的影响，对冻融循环因素对黄土的影响进行分析。师华强^[36]、宋春霞^[37]、杨成松^[38]等研究发现，对于干密度低的土体，干密度会增加，干密度高的土体则会降低，即对不同干密度的土体会产生密实或松散的双重作用。但多次冻融循环后，土体的干密度会趋于某一定值，并且这个定值只与土体的种类有关。倪万魁^[39]、肖东辉^[40]等研究发现，土体经历冻融循环后，粒径分布会发生改变。土体颗粒有变小的趋势，直至均一化。对于冻融循环后土体物理参数的研究，结论基本相似；但在土体抗剪强度的初期研究中，却有多种结论。一些学者认为，冻融循环后土体抗剪强度增加^[41]，另一些则认为减小^[42]，还有些则认为不变^[43]，由于研究的土体种类不同，结论也不甚相同。吕倩俐^[44]、齐吉琳^[45]、Yang等^[46]研究发现，随冻融次数的增加，土体强度曲线类型发生转变。方丽莉^[47]、常丹^[48]等研究发现，黏聚力和内摩擦角在冻融后产生不同变化趋势。刘宽^[49]、Chu等^[50]等研究发现土体应力-应变曲线类型受含水率影响大于冻融循环对其影响，在不同冻融期下，含水率对破坏强度劣化幅度不同。由于试验条件不同，苏谦^[51]、董晓宏^[52]等发现，冻融循环10次后土体强度和强度参数逐渐稳定，而王静^[53]则发现，土体经历7次冻融循环后就达到稳定。关于冻融循环下土体的动态行为，白等^[54]提出土体在冻融循环过程中需要经历冻胀、融沉、固结三个阶段。这些阶段受温度、冻融循环次数及冻融周期长度影响。Wang等^[55]发现饱和黄土在无补水封闭系统中表现出强于非冻融黄土的动态性能，其结构更趋稳定致密。Liu等^[56]指出冻融循环导致土体中水分重新分布，使含水量降低区域强度增加，含水量增加区域强度减弱。高等^[57]人观察到土体内部颗粒在相对较大的状态时，会发生破裂，颗粒变细，而细颗粒则因双电层效应而倾向于团聚。显然，冻融作用对力学性能的影响本质上是土体内部结构持续破坏与重组的过程^[58]。通过边界效应的数值模拟可发现，优化边界条件能使模拟结果更接近实验结果^[59-61]。

1.3 黄土的结构性参数研究现状

灵敏度（定义为原状土无侧限抗压强度与相应重塑土强度之比）是土体结构性研究中提出最早、应用最广泛的定量指标，目前已被广泛采纳为评价黏性土结构性的重要参数^[62-65]。为探索土体结构性定量描述的新路径，谢定义^[66]提出了综合结构势的概念，将

土体结构的联结特征和排列特征分别归纳为结构可稳性与结构可变性。土体结构性发生变化或丧失的根本机制主要归结为三种途径，即扰动、加荷与浸水：扰动可削弱土体的内部联结，降低粒间联结强度；加荷可改变颗粒的排列方式及其联结特征；浸水则能弱化或溶解土中化学物质，导致吸力联结丧失，同时水膜的楔入作用释放了土体固有的胀缩势能。结构可稳性与结构可变性可通过测定土体结构破坏的难易程度及其破坏后的变形程度加以定量表征，从而揭示结构性的演化规律。基于上述理论框架，众多学者进一步开展了复杂应力状态下土体结构性的研究，提出了多种结构性参数。根据其表征方式，可归纳为应变型结构性参数、应力型结构性参数、初始型结构性参数及其他类型结构性参数。

1. 应变型结构性参数

应变型结构性参数是基于变形条件考虑的，定义方式主要体现不同状态的结构性土体应变的差异性。谢定义等人^[66]通过对比原状土，重塑土和饱和土的侧限压缩试验，定义了综合结构势（也称应变结构性参数）为某一压力下饱和土样和重塑土样压缩应变的乘积与原状土压缩应变的平方的比值。

陈存礼等^[34, 67]反映出综合结构势随压力的变化，通过测限压缩试验对结构性参数的定义方法进行了改进。提出了孔隙比结构性参数，其定义为某一压力下原状样孔隙比的平方与饱和样和重塑样乘积的比值。在此基础上还提出增湿湿陷特性与结构性的内在联系，提出了增湿结构性参数，其定义为某一压力下原状样孔隙比与饱和和重塑样孔隙比的比值。

吴小锋等人^[68]进行等向固结试验并提出等向固结结构性参数，反映土体结构对应力的动态响应过程。其定义为某一等向压力下饱和样和重塑样的体积应变值的乘积与原状样体积应变值的比值。

参数类型	表达式	备注
综合结构势	$m_p = \frac{S_r S_s}{S_0^2}$	S_r —某一压力下重塑样的压缩应变 S_s —某一压力下饱和样的压缩应变 S_0 —某一压力下原状样的压缩应变
孔隙比结构性参数	$m_p = \frac{e_y^2}{e_r e_s}$	e_y —某一压力下原状样孔隙比 e_s —某一压力下饱和样孔隙比 e_r —某一压力下重塑样孔隙比
增湿结构性参数	$m_p = \frac{e_y}{e_{rs}}$	e_y —某一压力下原状样孔隙比 e_{rs} —某一压力下饱和和重塑样孔隙比