

DOI: 10.16030/j.heg.202511017

穆青翼, 戴宝林, 周超, 等. 黄土湿陷宏微观机制、理论模型及评价技术 [J]. 水文地质工程地质, 2026, 53(0): 1-20.  
MU Qingyi, DAI Baolin, ZHOU Chao, et al. Micro-macro mechanisms, theoretical models, and evaluation techniques of loess collapsibility[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2026, 53(0): 1-20.

## 黄土湿陷宏微观机制、理论模型及评价技术

穆青翼<sup>1,2,3</sup>, 戴宝林<sup>4</sup>, 周超<sup>4</sup>, 彭建兵<sup>1,2,3</sup>

- (1. 黄土科学全国重点实验室(长安大学), 陕西 西安 710054; 2. 陕西省黄河科学研究院(长安大学), 陕西 西安 710054; 3. 长安大学地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054; 4. 香港理工大学土木与环境工程系, 香港 九龙 999077)

**摘要:** 黄土广泛分布于我国西北地区, 是一种具有显著湿陷性的第四纪风积沉积物。黄土独特的“亚稳定”结构使其在低含水率下具有较高强度, 但在增湿和加载作用下易发生显著变形, 引发诸如边坡失稳、路基沉降等地质灾害和工程病害。文章系统综述了黄土湿陷宏微观机制、理论模型与评价技术。通过对比原状、压实与重塑黄土微观结构、持水特性、压缩与剪切行为, 揭示了微观结构、吸力和应力对黄土湿陷的影响机理; 基于非饱和弹塑性力学, 建立了考虑微观结构和非饱和耦合效应的本构模型和简化的弹塑性加载-湿陷模型; 结合简化弹塑性模型和机器学习模型以及时域反射技术, 提出了黄土湿陷的原位快速评价技术。研究为黄土湿陷地质灾害和工程病害的防控提供了理论和技术支撑。

**关键词:** 黄土; 湿陷; 宏观机制; 微观机制; 理论模型

**创新点:** (1) 阐明了微结构、吸力和应力对黄土湿陷影响机理; (2) 建立了考虑非饱和黄土微结构演化的弹塑性本构模型和湿陷简化计算方法; (3) 提出了基于简化计算方法和 TDR 的黄土湿陷原位快速评价技术

中图分类号: 文献标志码: A 文章编号: 1000-3665(2026)00-0001-20

## Micro-macro mechanisms, theoretical models, and evaluation techniques of loess collapsibility

MU Qingyi<sup>1,2,3</sup>, DAI Baolin<sup>4</sup>, ZHOU Chao<sup>4</sup>, PENG Jianbing<sup>1,2,3</sup>

- (1. State Key Laboratory of Loess Science, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China;  
2. Shaanxi Yellow River Scientific Research Institute, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China;  
3. School of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China;  
4. Department of Civil and Environmental Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Kowloon 999077, China)

**Abstract:** Loess, widely distributed across northwestern China, is a Quaternary aeolian deposit characterized by its pronounced collapsibility. Owing to its naturally metastable structure, loess exhibits high strength under low-moisture conditions but may experience significant deformation when subjected to loading/wetting, thereby triggering serious geohazards such as landslides and subsidence. Based on the authors' long-term research, this paper presents a comprehensive review of the micro-macro mechanisms, theoretical models, and evaluation methods of loess collapsibility. By comparing the microstructures, water retention properties, and compression and

收稿日期: 2025-11-12; 修订日期: 2026-01-12 投稿网址: www.swdzgcdz.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(42522705; 52279109; 51909205)

第一作者: 穆青翼(1988—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事灾害和生态地质研究。E-mail: qingyimu@chd.edu.cn

shear behavior of intact, compacted, and reconstituted loess, the coupled effects of soil structure and suction on collapse properties are elucidated. Furthermore, an elastoplastic constitutive model incorporating coupled structure-suction effects, and a simplified method for evaluating loess collapsibility, are developed. Combining the proposed simplified method with machine learning techniques and time domain reflectometry (TDR), an approach for in-situ rapid evaluation of loess collapsibility is proposed. These studies provide both theoretical and technical support for the assessment and mitigation of loess-related geohazards and engineering issues.

**Keywords:** loess; collapsibility; macro mechanism; micro mechanism; theoretical model

**Highlights:** (1) Clarified the influence mechanisms of microstructure, suction and stress on loess collapsibility; (2) Developed an elastoplastic constitutive model incorporating the microstructure evolution of unsaturated loess, along with a simplified calculation method for collapsibility; (3) Proposed an in-situ rapid evaluation technique for loess collapsibility based on the simplified calculation method and TDR

## 0 引言

黄土广泛分布于我国西北干旱及半干旱气候区,覆盖面积达  $60 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 其中具有显著湿陷性的区域约为  $43 \times 10^4 \text{ km}^2$ <sup>[1-6]</sup>。黄土因其独特的“亚稳定”结构而著称,该结构主要由粉粒骨架、黏粒表观胶结以及矿物胶结共同构成,并形成了巨孔、大孔和小孔等多尺度孔隙结构。这一特殊结构在低含水率状态下可维持较高的强度,但胶结作用因增湿和外部加载而破坏,从而产生显著变形,这一现象被称为黄土湿陷性<sup>[7-12]</sup>。黄土湿陷是导致众多地质灾害和工程病害的根本原因,例如路基沉降、场地塌陷、边坡失稳等<sup>[11-16]</sup>。

随着“一带一路”倡议的深入推进,我国黄土地区基础设施建设规模持续扩大<sup>[17-18]</sup>。对黄土场地进行准确、高效的湿陷性评价,是黄土地区工程建设的前提工作。目前,黄土湿陷性的定量评价依据湿陷系数  $I_c(I_c = \Delta e / (1 + e_0))$ , 可反映黄土从天然状态浸水饱和后的相对湿度量。此外通过湿陷指数  $I_e$  (200 kPa 下的湿陷系数) 可定性分析黄土场地的湿陷程度。例如,依据《湿陷性黄土地区建筑标准》<sup>[15]</sup> 给定的判别标准,通过原位上覆荷载下浸水试验测得的湿陷系数,其超过 1.5% 时即可判定土层具有湿陷性,并据此将湿陷程度划分为不同等级。而美国材料与试验协会发布的《土壤湿陷系数测量的标准试验方法 ASTM D5333-03》<sup>[19]</sup> 则通过 200 kPa 应力下测得的判别黄土是否湿陷的湿陷系数约为 0.1%, 并同样根据测得的  $I_c$  进一步划分湿陷等级。然而,这些试验方法存在以下显著局限:(1) 取样扰动: 黄土结构脆弱, 取样与运输过程中易破坏其原始结构, 导致试验结果偏差;(2) 耗时耗力: 室内试验需钻孔取样、制样、饱和、加载与沉降观测, 单个试验周期长达数天至数周, 难以满足大范围、线性基

础设施(如铁路、管道等)的快速勘察需求;(3) 成本高昂: 大规模钻探与试验费用高;(4) 空间变异性: 黄土沉积年代、矿物组成、孔隙结构及含水率沿深度与水平方向变化显著, 有限取样难以全面反映场地湿陷性。

为克服上述局限,基于弹塑性理论框架,诸多理论研究致力于模拟非饱和土的湿陷行为。Matyas 等<sup>[20]</sup> 提出了三维状态曲面(涉及孔隙比、净应力与吸力)的概念,可通过分析应力路径在状态曲面上的变化来计算黄土在加载和浸湿作用下的湿陷应变。在此理论基础,学者们针对不同非饱和土的状态曲面开展了大量研究<sup>[21-24]</sup>。此外,Alonso 等<sup>[25]</sup> 提出的加载-湿陷(LC)曲线理论,进一步实现了复杂应力与吸力条件下湿陷变形的计算。Yao 等<sup>[26]</sup> 和 Luo 等<sup>[27]</sup> 基于吸应力的概念提出了修正的 LC 曲线方程,与 Yao 等<sup>[28]</sup> 提出的统一硬化模型相结合能更准确地预测超固结非饱和土的力学行为。Alonso 等<sup>[25]</sup> 的研究也被拓展至考虑水力-力学耦合效应<sup>[29-33]</sup>。Gallipoli 等<sup>[30]</sup> 提出了考虑孔隙比变化的非饱和土饱和度变化关系式,结合弹塑性应力-应变模型可预测不同应力状态下非饱和土的力学行为。然而,这些理论模型大多针对压实土建立,未能考虑结构性土体在加载-浸湿过程中的结构演化特征,因而在湿陷预测方面存在精度不足的问题。尤其是针对原状黄土这类特殊结构性土,其可能存在三种特殊结构状态<sup>[34]</sup>: 黏土颗粒胶结主导,矿物胶结主导和二者共同主导。现有模型针对特定类型的结构性土提出,且只包含了归一化 LC 曲线的一种结构状态情况<sup>[25, 35-36]</sup>。因此, Mu 等<sup>[34]</sup> 提出了统一方法,用于模拟具有不同结构状态的非饱和土归一化 LC 曲线。该方法不仅纳入了结构退化过程中 LC 曲线演化规律,同时考虑了结构性对剪胀行为影响,从

而提升了模型对结构性土复杂力学响应的模拟能力。

然而,本构模型在计算非饱和黄土加载-浸湿变形时需确定大量参数和状态变量,这在实际工程中较为困难。以巴塞罗那模型为例<sup>[25]</sup>,其包含10个参数,且参数标定需通过吸力控制和应力控制的三轴试验。非饱和土试验设备昂贵、耗时漫长(单个试验通常需7~14 d),加之受土类与结构性影响,使得参数校准工作极为复杂。为实现快速评价黄土场地湿陷性,国内外学者提出了定性和定量评价黄土湿陷性的简易模型。对于黄土湿陷性的定性评价模型,Denisov<sup>[37]</sup>基于液限孔隙比和天然孔隙比提出一个湿陷判定准则。随后,Holtz等<sup>[38]</sup>利用该准则对黄土湿陷性进行判定并取得较好效果。Gibbs等<sup>[39]</sup>在Denisov<sup>[37]</sup>与Holtz等<sup>[38]</sup>研究基础上,基于原位浸水试验和室内压缩试验结果,采用液限和液限状态下干密度绘制湿陷准则线,判定当干密度小于液限状态下干密度时具有湿陷性,反之则不具有湿陷性,该模型成功评价了多个黄土场地湿陷性。Fedá<sup>[40]</sup>通过室内压缩试验提出考虑含水率、饱和度和液、塑限的湿陷性评价指标,判定该指标大于0.85时黄土具有湿陷性,反之则不具有湿陷性,该方法在不同黄土地区的湿陷性评价中效果具有差异性。然而,上述模型仅可定性判定黄土有无湿陷性,尚不能达到《湿陷性黄土地区建筑标准》<sup>[15]</sup>和ASTM D5333-03<sup>[19]</sup>中湿陷程度的精细划分。

对于定量评价黄土湿陷性的经验模型,Basma等<sup>[41]</sup>综合考虑粒径级配、含水率、干密度、和上覆荷载对压实土湿陷性影响,采用多元回归分析提出经验湿陷性模型,通过该模型对Houston等<sup>[42]</sup>研究的原状黄土进行湿陷性预测,取得较好效果。Lim等<sup>[43]</sup>在Basma等<sup>[41]</sup>研究基础上,考虑路基工程的压实条件并提出基于物性指标的经验模型,通过两个场地核验证明该模型具有较好的预测效果。邵生俊等<sup>[44]</sup>利用因子分析法对两个场地勘察数据进行分析,确定影响黄土湿陷性的主要指标,通过多元回归分析建立经验湿陷性模型。Wang等<sup>[6]</sup>提出一个包含三个参数的复合幂指数模型,利用该模型对两个场地进行湿陷性评价并取得较好效果。Mu等<sup>[45]</sup>通过采用孔隙指数对饱和与非饱和状态下原状黄土的压缩曲线进行归一化处理,提出一种基于弹塑性框架的简易方法,用于预测原状黄土在加载和浸水条件下的湿陷量。此外,得益于机器学习方法在处理非线性问题、特征提取与模式识别等方面的独特优势,其在岩土工程领域得到了广泛应用。Mu等<sup>[8]</sup>借助多表达式编程(Multi Expression Programming,

MEP)和反向传播神经网络(Back-Propagation Neural Network, BPNN)建立了黄土湿陷系数计算公式并成功应用于西北地区黄土湿陷性评价。

随着原位测试技术的发展,时域反射技术(Time-Domain Reflectometry, TDR)被证实可快速、无损地测定土体介电常数与电导率,进而反演干密度与含水率<sup>[46-51]</sup>。结合经验或理论湿陷模型,TDR有望实现黄土湿陷性的原位快速评价。然而,现有研究多聚焦于单一模型或局部场地,缺乏对黄土湿陷微观机制的深入探讨与多模型对比验证。穆青翼等<sup>[46]</sup>基于TDR开展了黄土干密度和含水率的原位测试,取得较好效果。然而,该方法存在两个不足之处:首先,不同场地的土体特性存在差异,需重复开展参数标定试验;其次,TDR测试的电导率受现场土体孔隙水电导率影响,这将降低干密度和含水率的测试精度。在此基础上,张继文等<sup>[52]</sup>借助TDR和简易环刀法原位测试黄土体积含水率和湿密度,结合Mu等<sup>[8,45]</sup>提出的弹塑性黄土湿陷预测模型和MEP机器学习模型,实现了黄土湿陷性的高效、经济评价。

鉴于黄土湿陷机制复杂、现有模型参数繁多且评价手段效率偏低,本文构建了一种信息化黄土湿陷性勘察与评价体系,以提高湿陷性评价的精度与效率。围绕这一总体目标,研究内容包括:(1)非饱和结构性黄土在水-力耦合作用下微观结构的演化机理;(2)结构性黄土的本构模型构建及湿陷系数的简化计算方法;(3)结构性黄土关键岩土参数的反演机制与湿陷性的原位快速评价方法。通过将理论模型、简化算法与TDR测试技术协同集成,构建“快速勘察-精准评价”一体化技术路径,最终实现防灾减灾、保障工程安全目标。

## 1 黄土矿物成分和微观结构

### 1.1 矿物成分

图1展示了典型黄土的X射线衍射图谱。

图中 $5^{\circ}$ ~ $20^{\circ}$ 范围内的衍射峰主要对应黏土矿物,而 $20^{\circ}$ ~ $40^{\circ}$ 范围内的衍射峰则代表非黏土矿物。由此可见, $20^{\circ}$ ~ $40^{\circ}$ 区间的峰值强度显著高于 $5^{\circ}$ ~ $20^{\circ}$ 区间,表明非黏土矿物在黄土中占据主导地位。经分析识别出的非黏土矿物包括石英(Q)、钠长石(A)、方解石(Ca)及沸石(Z)。其中方解石作为一种胶结性矿物,可能来源于初始风成沉积过程或由后期再沉淀作用形成。另一方面,所测试黄土中的黏土矿物主要包括高岭石(K)、伊利石(I)和绿泥石(C)。

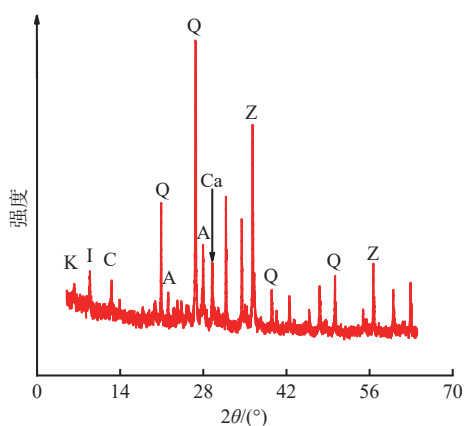


图 1 典型黄土的 X 射线衍射图谱<sup>[53]</sup>

Fig. 1 X-ray diffraction pattern of loess<sup>[53]</sup>

### 1.2 微观结构

黄土的微观结构对其水-力学行为具有显著影响。典型原状、压实、重塑黄土的微观结构扫描电镜图像如图 2 所示。研究表明原状、压实和重塑黄土均

包含黏-粉团粒、黏团粒、粉粒、黏粒,但各组分比例不同<sup>[54-55]</sup>。颗粒接触方面,原状黄土以黏粒连接和矿物胶接(如碳酸钙)为主,而压实和重塑黄土以接触连接为主。原状黄土上述特殊的接触方式可能归因于初始风驱沉积作用以及随后与气候的相互作用。此外,原状、压实和重塑黄土均具有典型的团聚结构,由粉粒与黏粒共同形成团聚体,其间分布有团间孔隙与团内孔隙<sup>[9, 53, 56-58]</sup>。尤其值得注意的是,原状黄土中广泛存在直径可达数百微米的巨型孔隙(图 3),这些孔隙在吸力与胶结作用下可保持稳定,但在湿化或加载条件下易发生塌陷。相比之下,压实黄土在制备过程中经历破碎、筛分与静压成型,其超大孔隙显著减少,黏土颗粒的胶结作用被破坏,颗粒间以直接接触为主,导致其结构强度较低。重塑黄土则因经过泥浆化和一维固结,孔隙分布更为均匀,缺乏大孔隙,孔隙结构更为均质。

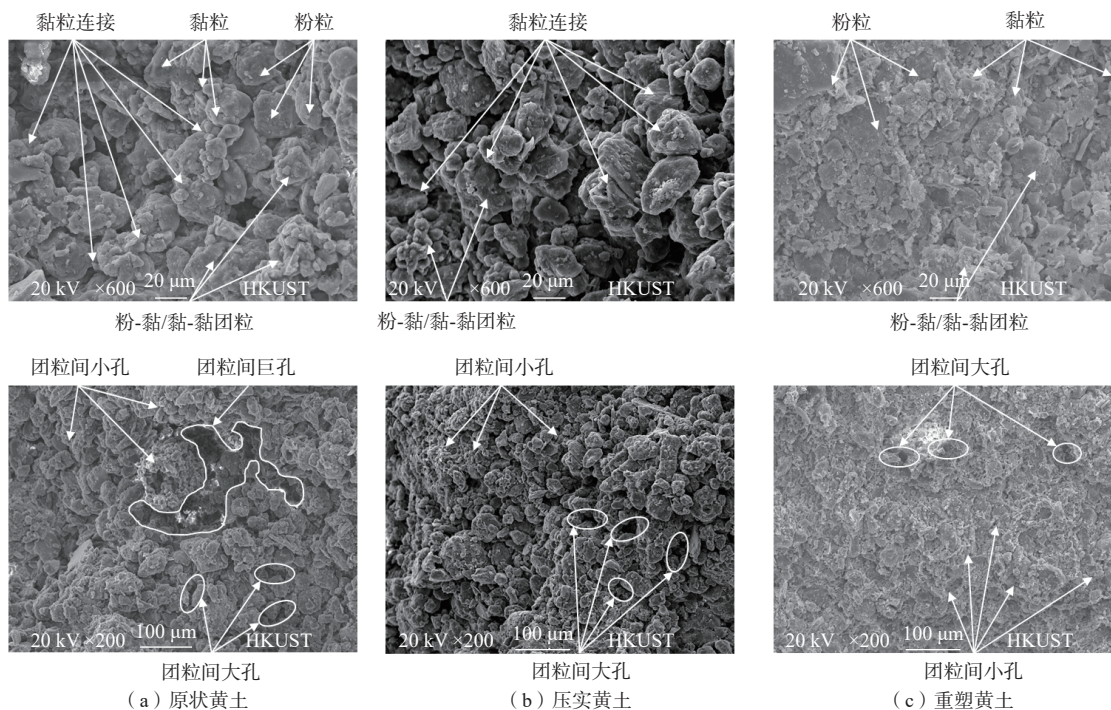


图 2 非饱和黄土的微观结构<sup>[9, 53, 56-58]</sup>

Fig. 2 Microstructures of unsaturated loess<sup>[9, 53, 56-58]</sup>

基于上述微观结构分析,黄土中可归纳出如图 4 所示的五类典型微观组构:黏团粒、黏粒、粉-黏团粒、胶结矿物以及粉粒。这五类组构共同构成了三种不同的微观胶结特性:矿物胶结、黏粒胶结以及矿物与黏粒协同胶结。三种胶结机制协同作用,赋予黄土多尺度的孔隙结构特征。其中,矿物胶结主要受外部荷载影响,而黏粒胶结及矿物与黏粒协同胶结则受土

体湿度与外部荷载的共同控制。当黄土处于水力耦合加载条件下,这三种胶结特性将发生协同演化,最终导致黄土产生湿陷行为。

## 2 非饱和黄土水-力学特性

### 2.1 持水特性

图 5 展示了原状、压实和重塑黄土(初始体积含

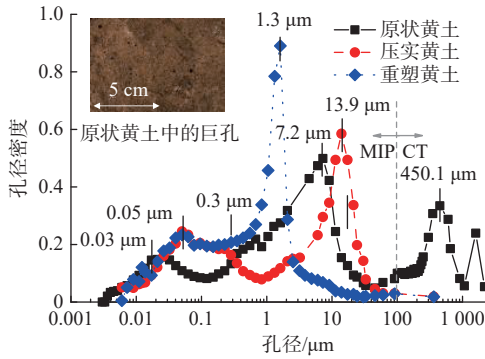


图3 原状、压实和重塑黄土孔径分布特性<sup>[59-61]</sup>

Fig. 3 Pore size distributions of intact, compacted, and reconstituted loess<sup>[59-61]</sup>

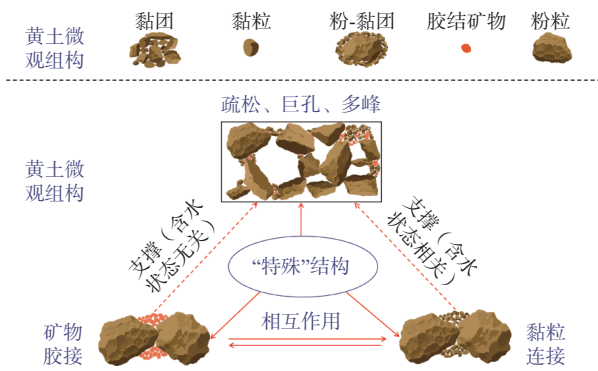


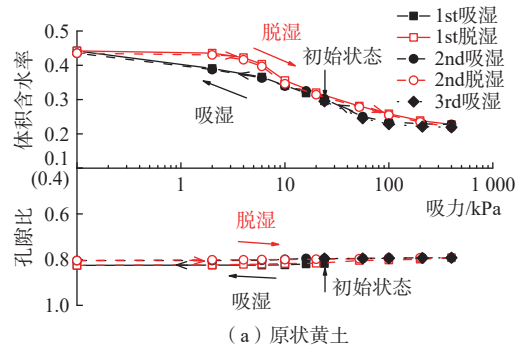
图4 水力耦合作用下黄土湿陷性的微观机理<sup>[53]</sup>

Fig. 4 Micro-mechanisms of loess collapse under hydro-mechanical loading<sup>[53]</sup>

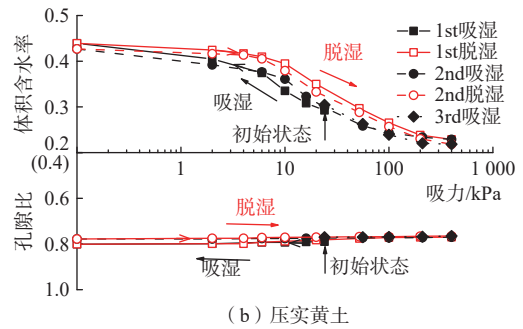
水率为 44%，干密度为 1.52 g/cm<sup>3</sup>) 在两次干湿循环下的持水特征曲线。试验黄土取自陕西泾阳，吸力施加路径是 0.1, 2, 4, 8, 10, 20, 50, 100, 00, 400 kPa。从图中可以看到重塑黄土在首次干燥路径中的进气值显著高于原状和压实黄土，分别高出 505% 和 169%。这一现象主要归因于重塑黄土具有更小的峰值孔径，从而导致其进气值显著增加<sup>[58-59, 62-63]</sup>。此外，尽管三者初始孔隙比接近，但重塑黄土在首次干燥中发生 28% 的显著收缩，而原状和压实黄土收缩不足 3%。这一差异主要源于重塑黄土孔径较小增强了毛细作用，从而赋予其更强的持水能力。在相同吸力增量条件下，重塑黄土的饱和度最高，导致平均骨架应力增长最为显著，最终引发明显的收缩变形<sup>[59, 64-67]</sup>。

### 2.2 压缩和湿陷特性

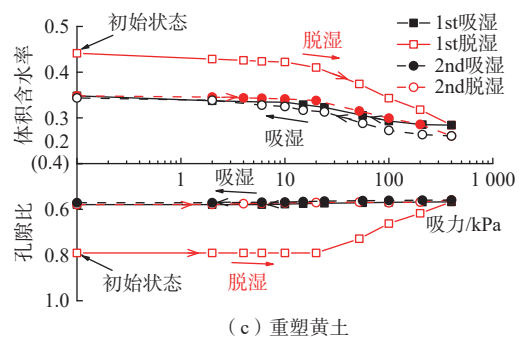
图 6 展示了原状黄土与压实黄土(初始孔隙比为 0.79)在不同吸力条件下的压缩曲线，其孔隙比与竖向应力之间呈现出显著的非线性关系。曲线均可区分弹性段与塑性段，二者交点定义为屈服应力。结果显示，原状和压实黄土的屈服应力均随吸力减小明显降



(a) 原状黄土



(b) 压实黄土



(c) 重塑黄土

图5 非饱和黄土的持水特性<sup>[59]</sup>，吸力/kPa

Fig. 5 Water retention curves of unsaturated loess<sup>[59]</sup>

低。这一变化主要源于两方面：一是毛细弯液面数量减少，削弱了其对土骨架的张拉稳定作用；二是黏土颗粒间胶结作用随含水率上升而减弱，导致结构强度下降<sup>[9, 31, 68-69]</sup>。此外对比原状和压实黄土的屈服应力可以发现，原状黄土压缩曲线具有更大的结构允许空间。在给定吸力下，原状黄土的屈服应力均高于压实黄土，且随吸力增大，二者差距显著增大。这归因于，一方面原状黄土中的黏土和矿物连接提供了支撑作用，另一方面黏土连接导致其屈服应力对水分变化更敏感<sup>[70]</sup>。

图 7 展示了原状和压实黄土(初始孔隙比为 0.79)的湿陷特性。在 200 kPa 和 800 kPa 竖向应力下注水饱和(S200V200 和 S200V800)，注水后的压缩曲线均与饱和试样曲线重合。结果表明，原状与压实黄土均发生湿陷变形，且增湿引起的湿陷变形量与相应应力

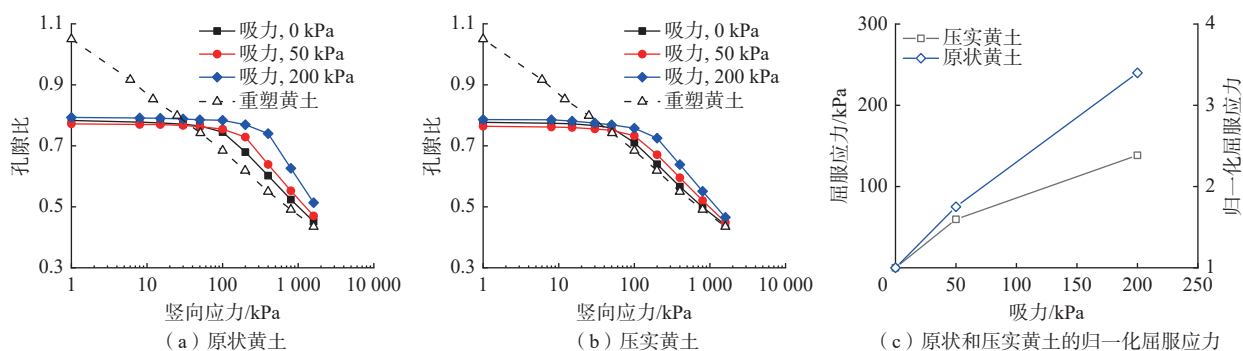


图 6 非饱和黄土的压缩特性<sup>[54]</sup>

Fig. 6 Compression behavior of unsaturated loess<sup>[54]</sup>

水平下饱和与非饱和压缩曲线之间的孔隙比差值基本一致。此外通过计算并对比原状和压实黄土湿陷系数可发现,较小应力状态下,原状黄土湿陷与压实黄土差别不大<sup>[71]</sup>。较大应力状态下(400 kPa),原状黄土湿陷较压实黄土显著增大(0.08 ~ 0.17)。这归因于

原状黄土较强的结构性,其在 200 kPa 下仍保持较高孔隙比,浸水时仅部分黏土和矿物胶结失效导致有限湿陷变形。在 800 kPa 应力下,黏土和胶结矿物胶结程度大幅度降低,颗粒从点接触转为面接触,巨孔和大孔被压缩,表现出显著湿陷变形<sup>[70]</sup>。

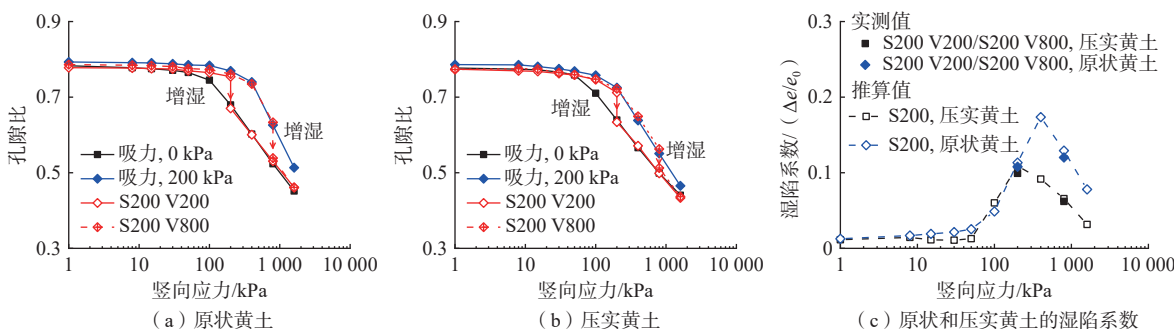


图 7 非饱和黄土的湿陷特性<sup>[54]</sup>

Fig. 7 Collapsibility of unsaturated loess<sup>[54]</sup>

### 2.3 剪切特性

图 8 展示了不同吸力下原状与压实黄土的剪切行为。原状黄土在 0 kPa 吸力下表现为应变硬化,随吸力增大逐渐转向应变软化,且在 200 kPa 吸力时出现峰值后强度降低。所有吸力下重塑黄土均呈应变硬化,达到稳定所需位移(约 2.5 mm)大于原状黄土。随吸力增加,两类制样方法下黄土均从收缩转为膨胀变形,表明高吸力下土体更易膨胀。原状黄土在吸力降至 100 kPa 时仍膨胀,而压实黄土仅在 200 kPa 时才膨胀,说明膨胀行为除受应力状态和孔隙比影响外,还与黄土结构有关。原状黄土中黏土颗粒在接触点处形成的稳定结构是其膨胀性更显著的主因<sup>[72-73]</sup>。从图 8 (c)可看出,吸力从 0 增至 200 kPa,原状和压实黄土的峰值剪切强度分别提高 165% 和 102%。低吸力下,原状和压实黄土强度差别不大。高吸力下,原状较压实黄土具有更大的峰值强度,且随吸力增加,二者差别扩大。这归因于表观黏聚力和剪胀角均随吸力增大

而提高。在 200 kPa 吸力下,原状样因更大的剪胀角而表现出明显高于压实样的峰值强度<sup>[74]</sup>。

### 3 非饱和结构性黄土本构模型

与重塑土相比,结构性土通常表现出更高的屈服应力,但在屈服后因结构退化而具有更强的压缩性。现有针对饱和结构土的本构模型主要聚焦于结构特性表征、结构随塑性应变的退化机制以及结构对剪切行为的影响。结构特征常通过与重塑土在屈服应力、孔隙比及固结线斜率上的差异进行量化;结构退化则通常与塑性变形过程相关;在剪切行为方面,土体结构通过影响剪胀特性改变土体的力学响应,该过程通常采用结构耦合的非关联流动法则进行描述<sup>[25, 35-36]</sup>。然而,实际工程中的土体多处于非饱和状态,微观结构与非饱和的耦合作用显著影响水分分布及水力学行为,进而对土体的工程性能产生关键影响。如图 9 (a)所示,实验结果表明加载湿陷曲线可能呈现三种

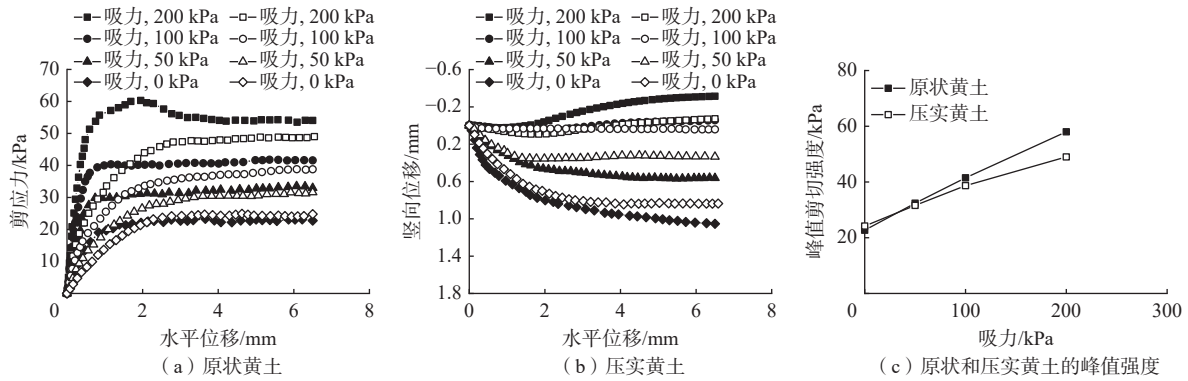


图 8 非饱和黄土的剪切特性<sup>[72]</sup>  
Fig. 8 Shear behavior of unsaturated loess<sup>[72]</sup>

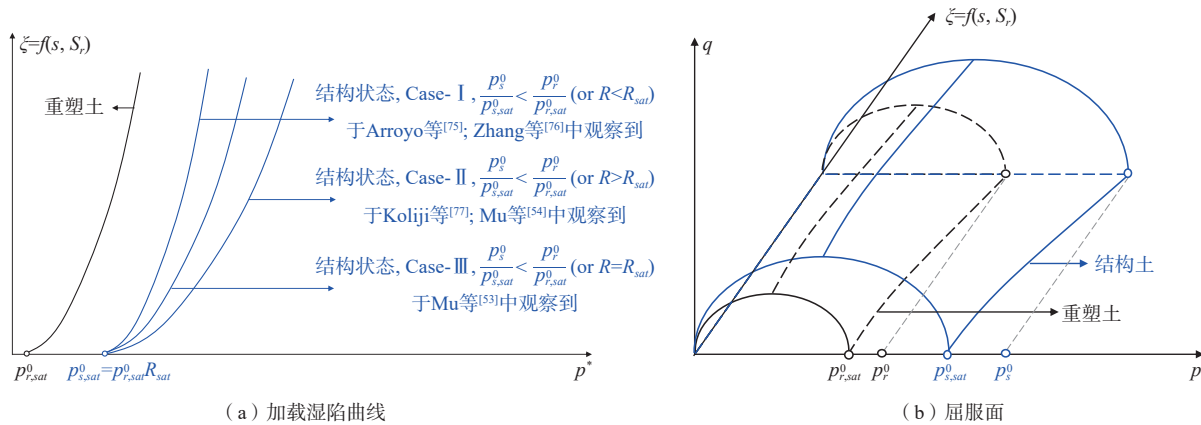


图 9 结构效应对非饱和土力学行为的影响<sup>[34]</sup>  
Fig. 9 Structure effects on unsaturated soil behavior<sup>[34]</sup>

典型模式<sup>[34]</sup>: 矿物胶结主导<sup>[75-76]</sup>(Case-I)、黏土颗粒胶结主导<sup>[54, 77]</sup>(Case-II)以及黏土颗粒与矿物胶结共同主导<sup>[53]</sup>(Case-III)。

在这三种模式中, 结构性土体的先期固结应力相较于重塑土对湿度的敏感性表现出不同特征: 在 Case-I 中较不敏感(如水泥固化土等), 在 Case-II 中则更为敏感(如原状黄土等), 而在 Case-III 中则表现出相似的敏感性(如部分原状土)。现有本构模型多局限于 Case-I, 难以统一描述不同类型土体的力学行为, 且普遍未考虑微观结构对剪胀特性的影响, 从而在预测体应变、应力演化及湿陷变形时存在偏差。

研究建立了一种能够兼容三种 LC 曲线类型并引入结构耦合的非关联流动法则的统一本构模型<sup>[34]</sup>。该本构模型采用平均 Bishop 应力  $p^*$ 、偏应力  $q$  和吸力  $s$  作为基本应力变量, 并引入颗粒间法向力参数  $\zeta = f(s)(1-S)$  以考虑非饱和状态下弯液面对骨架应力的增强效应。模型中关键状态变量非饱和结构参数  $R$ , 定义为结构化土与重构土在相同湿度下的屈服应力之比, 其表达式如下:

$$R = (R_{sat})^{1+c/\left[1 + \left(\ln R_{sat} / \ln \frac{p_r^0}{p_{r,sat}^0}\right)\right]} \quad (1)$$

其中,  $c$  与结构特征相关, 控制着先期固结压力对含水条件的敏感性。

如式(1)所示, 当  $c$  取负值(Case-I)、正值(Case-II)或零值(Case-III)时,  $R$  的值分别小于、大于和等于  $R_{sat}$ 。当土壤达到完全饱和状态时,  $p_r^0$  (给定湿度情况下重塑土的屈服应力) =  $p_{r,sat}^0$  (饱和情况下重塑土的屈服应力), 非饱和结构参数( $R$ )会转变为饱和条件下的结构参数( $R_{sat}$ )。在应力和水力荷载作用下, 土体结构会因塑性变形破坏粘结而引发结构退化。对于饱和条件下的结构性土体, 其减量  $dR_{sat}$  与损伤应变相关, 该应变定义为塑性体积应变和偏应变的函数:

$$\frac{dR_{sat}}{R_{sat} - 1} = -\beta_0 \sqrt{(d\varepsilon_v^p)^2 + (d\varepsilon_q^p)^2} \quad (2)$$

其中,  $d\varepsilon^d$ ,  $d\varepsilon_v^p$  和  $d\varepsilon_q^p$  分别表示损伤应变、塑性体积应变和塑性偏应力应变的增量,  $\beta_0$  为正参数, 其值越大表明结构退化程度越快。

此外, 文献中的实验数据<sup>[72]</sup>, 表明随着结构退化, 结构化土体的归一化 LC 曲线会向重构土体的曲线趋

近。这种行为可通过考虑  $c$  值随结构退化而变化,如下式所示:

$$\frac{dc}{c} = \beta_1 \frac{dR_{sat}}{R_{sat} - 1} \quad (3)$$

其中,  $\beta_1$  控制  $c$  随结构劣化变化速率的正参数。

随着土体结构劣化,  $c$  值逐渐趋近于零, 归一化 LC 曲线随之趋近于重塑土体的状态。如图 10(b) 所示, 对于当前屈服曲面内的应力状态, 仅发生弹性变

形。弹性应变的计算使用以下公式:

$$\begin{cases} d\varepsilon_v^e = \frac{\kappa dp^*}{(1+e)p^*} \\ d\varepsilon_q^e = \frac{2\kappa(1+\mu)}{9(1+e)(1-2\mu)} \frac{dq}{p^*} \end{cases} \quad (4)$$

其中,  $\kappa$  表示各向同性固结下, 土体卸载再加载过程中在  $e - \ln p^*$  平面内的斜率;  $\mu$  代表泊松比。

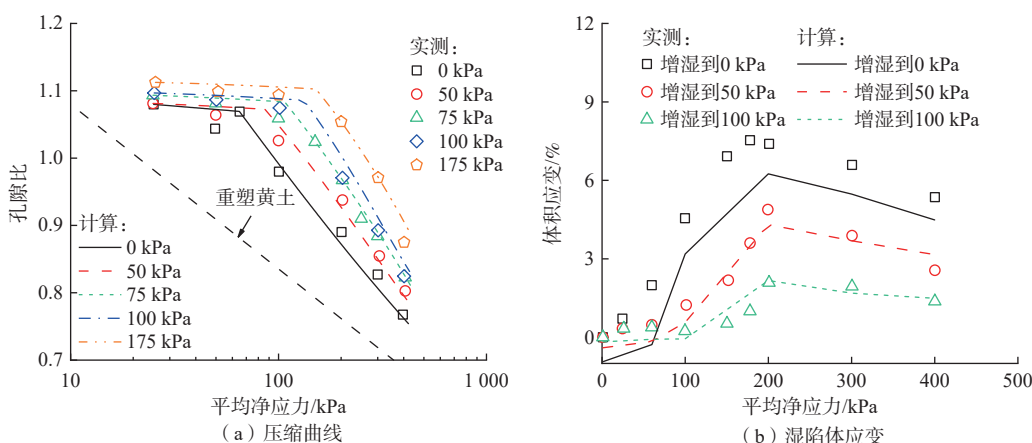


图 10 黄土压缩特性计算与实测对比<sup>[34]</sup>

Fig. 10 Comparison of measured and calculated compression behavior<sup>[34]</sup>

在  $p^*-q$  平面中采用了椭圆形的屈服面:

$$f = q^2 - M^2(p_s^0 - p^*)(p^* + p_b) = 0 \quad (5)$$

其中,  $M$  代表临界状态线在  $q-p^*$  平面内的斜率;  $p_s^0$  代表结构土在给定湿度条件下的屈服应力;  $p_b$  代表屈服面与各向同性拉伸线交点处的平均 Bishop 应力。

屈服面的一致性条件表明:

$$\begin{aligned} df &= \left( M^2 p^* + M^2 p_b - \frac{q^2}{p^* + p_b} \right) dp^* + 2q dq - \\ & M^2(p^* + p_b) dp_s^0 - \frac{q^2}{p^* + p_b} dp_b = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

硬化法则采用如下公式:

$$\frac{dp_s^0}{p_s^0} = \frac{dN}{\lambda - \kappa} + \left( \ln R - \ln \left( \frac{p_s^0}{p_{ref}} \right) \right) \frac{d\lambda}{\lambda - \kappa} + \frac{1+e}{\lambda - \kappa} d\varepsilon_v^p + \frac{dR}{R} \quad (7)$$

其中,  $N$  和  $\lambda$  分别为给定湿度下重塑土正常固结线的截距与斜率,  $p_{ref}$  为参考应力 (1 kPa)。

Liu 等<sup>[78]</sup> 的研究表明, 在饱和条件下, 结构性土体通常具有高于重塑土的塑性应变增量比  $d\varepsilon_v^p/d\varepsilon_q^p$ 。这一现象在非饱和条件下的结构性土体中同样被观察到<sup>[27]</sup>。因此, 本文对 Liu 等<sup>[78]</sup> 的原有模型进行了修正, 提出如下考虑结构性的非关联流动法则:

$$\frac{d\varepsilon_v^p}{d\varepsilon_q^p} = \frac{M^2 - \eta^2}{2\eta \exp(-\omega \Delta e)} \quad (8)$$

其中,  $\eta$  为应力比,  $\omega$  是描述结构对膨胀性影响的参数,  $\Delta e$  表示在给定应力和饱和度状态下, 结构性土与重塑土孔隙比之间的差值。

本研究建立的饱和/非饱和土本构模型新增了 5 个参数 ( $R_{sat}$ ,  $c$ ,  $\beta_0$ ,  $\beta_1$  和  $\omega$ ) 以考虑结构效应。结构性参数  $R_{sat}$  的初始值可通过根据结构性土体的先期固结压力计算得出。参数  $c$  的初始值可基于结构性土体的 LC 曲线进行标定。通过分别模拟饱和与非饱和状态下结构化土体的正常固结曲线, 可获得  $\beta_0$  和  $\beta_1$  的数值。此外,  $\omega$  可通过公式 (8) 进行标定, 其余参数的确定详见 Mu 等<sup>[34]</sup> 的研究。

图 10(a) 黄土压缩特性计算<sup>[34]</sup> 与 Zhang 等<sup>[76]</sup> 实测结果对比, 土骨架维持的孔隙比随吸力增大显著增加, 模型能较好地捕捉原状黄土的压缩行为。图 10(b) 呈现了试样在不同吸力值下湿润诱发体积应变的实测与计算结果。体积应变曲线可分为三个区段: 当应力小于饱和试样屈服应力时, 湿润诱发的应变相对较小; 随着应力增加, 体积应变开始显著增大; 最终当非饱和试样屈服时, 由于非饱和试样更高的压缩性, 体

积应变逐渐减小。预测最大体积应变出现在非饱和试样承受等于其屈服应力的荷载时, 这与试验结果高度吻合, 模拟结果验证了模型在预测压缩及湿润诱发塌陷行为方面的优异性能。

图 11(a)(b)给出了 Xu 等<sup>[79]</sup>的剪切试验结果与模型预测的对比, 表明该模型可有效再现原状与重塑黄土的应力-应变特性, 包括弹性阶段、屈服点及强度演化, 同时准确捕捉体积应变变化趋势。图 10(c)对

比了计算与 Haeri 等<sup>[7]</sup>实测剪切结果。原状黄土的抗剪强度在轴向应变约 15% 处达到峰值, 随着剪切持续基本保持稳定, 表明试样在剪切阶段末期已接近临界状态。由于土骨架刚度较高, 偏应力随着各向等压应力和吸力的增加而增大。当轴向应变小于 10% 时, 计算与实测结果最大偏差为 10%。总体而言, 结果表明该模型能较好地模拟结构性和非饱和土的剪切特性。

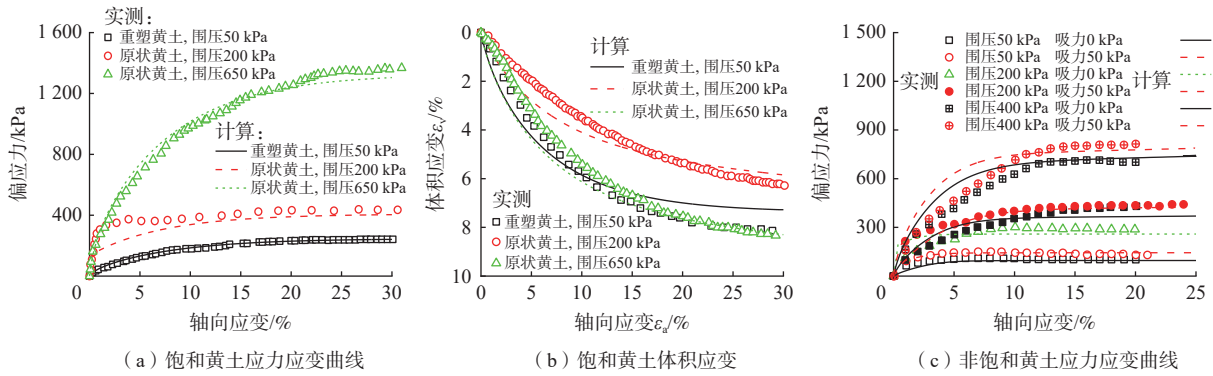


图 11 原状和重塑黄土剪切特性计算与实测对比<sup>[34]</sup>

Fig. 11 Comparisons of shear behavior between intact and reconstituted loess<sup>[34]</sup>

## 4 黄土湿陷评估模型

### 4.1 简化弹塑性模型

采用双线法计算原状黄土湿陷系数, 本研究基于前文的弹塑性理论框架的提出了一种原状黄土湿陷系数计算模型, 其基本理论框架如图 12 所示<sup>[45]</sup>。

借鉴 Burland<sup>[80]</sup>提出的孔隙指数计算方法, 对 34 组饱和及 40 组非饱和原状黄土压缩曲线进行归一化处理(图 13)。结果表明, 在进入弹塑性阶段后, 孔隙指数  $I_v$  与竖向应力对数  $\log \sigma$ (以 10 为底)之间呈现良

好线性关系, 如式(9)所示:

$$I_v = \frac{e - e_{100}}{e_{100} - e_{1000}} = -\log \left( \frac{\sigma}{100} \right) \quad (9)$$

因此可得到饱和土弹塑性阶段压缩方程为:

$$e^{sat} = e_{100}^{sat} - (e_{100}^{sat} - e_{1000}^{sat}) \log \left( \frac{\sigma}{100} \right) \quad (10)$$

非饱和状态下类似, 具有不同截距与斜率:

$$e^w = e_{100}^w - (e_{100}^w - e_{1000}^w) \log \left( \frac{\sigma}{100} \right) \quad (11)$$

对于土体压缩曲线弹塑性阶段, Gallipoli 等<sup>[81]</sup>提

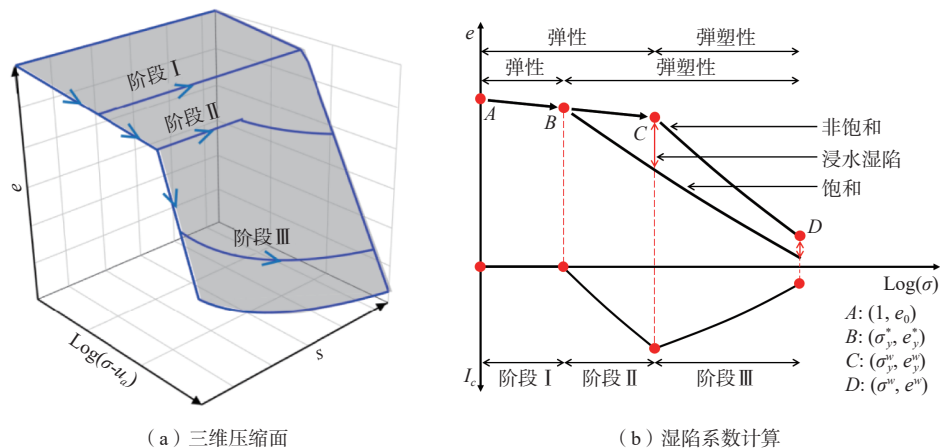


图 12 原状黄土压缩和湿陷示意图<sup>[45]</sup>

Fig. 12 Compression and wetting collapse of intact loess<sup>[45]</sup>

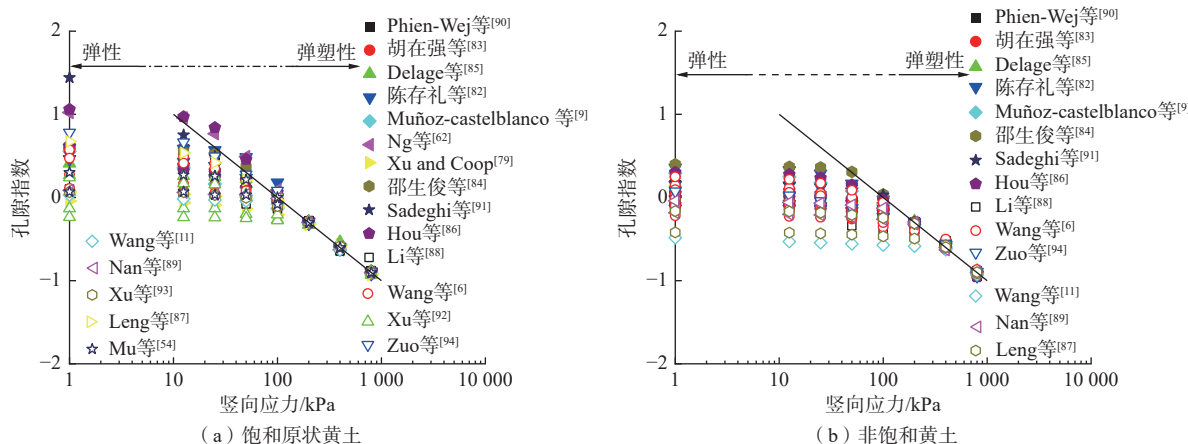


图 13 饱和/非饱和和原状黄土压缩曲线<sup>[6, 9, 11, 54, 62, 79, 82 - 94]</sup>

Fig. 13 Compression curves of intact loess<sup>[6, 9, 11, 54, 62, 79, 82 - 94]</sup>

出在给定应力条件下, 非饱和孔隙比和饱和孔隙比之比可以通过幂指数方程和土体饱和程度关联(图 14), 如式(12)所示:

$$\frac{e_{100}^w}{e_{100}^{sat}} = \frac{e_{1000}^w}{e_{1000}^{sat}} = (S_{r0})^{-k} \quad (12)$$

大量试验研究表明, 原状黄土弹性压缩阶段受黄土类型和含水率条件不同差异较小。

因此, 假设原状黄土在饱和及非饱和条件下的弹性压缩曲线重合, 并且在孔隙比  $e$  和竖向应力  $\log(\sigma)$  的平面内遵循线性变化关系:

$$e = e_0 - C_s \log\left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right) \quad (13)$$

因此联立式(8)–(12), 并结合湿陷系数定义, 可得到原状黄土在给定竖向应力下的湿陷系数计算式:

$$I_c = \begin{cases} 0, & \sigma \leq \sigma_y^{sat} \\ \frac{e_0 - e_{100}^{sat} - C_s \log(\sigma/\sigma_0) + (e_{100}^{sat} - e_{1000}^{sat}) \log(\sigma/100)}{1 + e_0}, & \sigma_y^{sat} < \sigma < \sigma_y^w \\ \frac{[e_{100}^{sat} - (e_{100}^{sat} - e_{1000}^{sat}) \log(\sigma/100)] [(S_{r0})^{-k} - 1]}{1 + e_0}, & \sigma \geq \sigma_y^w \end{cases} \quad (14)$$

式(14)为分段式计算式, 分别对应于图 12 所示的三段湿陷系数曲线(阶段 I、阶段 II 和阶段 III)。此外, 饱和/非饱和和原状黄土的屈服应力也可以基于计算式(8)至(12)获得:

$$\log(\sigma_y^{sat}) = \frac{e_{100}^{sat} - e_0 + (e_{100}^{sat} - e_{1000}^{sat}) \log(100) - C_s \log(\sigma_0)}{C_c - C_s} \quad (15)$$

$$\log(\sigma_y^w) = \frac{e_{100}^{sat} (S_{r0})^{-k} - e_0 + (e_{100}^{sat} - e_{1000}^{sat}) (S_{r0})^{-k} \log(100) - C_s \log(\sigma_0)}{(e_{100}^{sat} - e_{1000}^{sat}) (S_{r0})^{-k} - C_s} \quad (16)$$

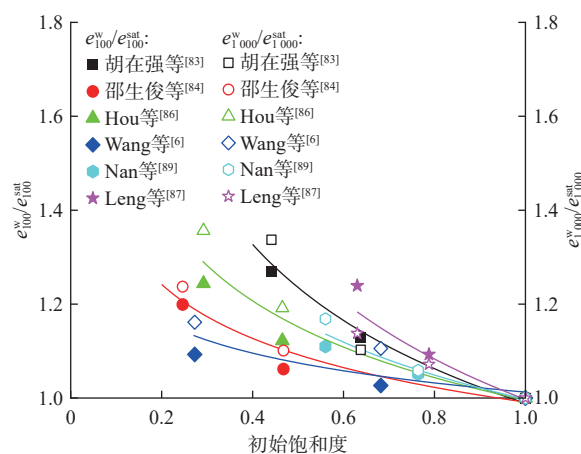


图 14 原状黄土初始饱和度和  $e_{100}^w/e_{100}^{sat}$  和  $e_{1000}^w/e_{1000}^{sat}$  之间关系<sup>[45]</sup>

Fig. 14 Relation between  $e_{100}^w/e_{100}^{sat}$  (and  $e_{1000}^w/e_{1000}^{sat}$ ) and initial degree of saturation for intact loess<sup>[45]</sup>

模型包含 4 个参数: 饱和弹性压缩参数  $e_{100}^{sat}$  和  $e_{1000}^{sat}$ , 弹性压缩阶段斜率  $C_s$  和非饱和土性参数  $k$ 。本研究通过多元回归分析建立了这些参数与基本物理指标(初始孔隙比  $e_0$  和液限孔隙比  $e_L$ )之间的经验关系, 其中  $C_s$  是通过文献中收集到的 74 组原状黄土一维压缩曲线的弹性压缩阶段斜率求平均值获得(均值: 0.010 1; 标准误差: 0.002), 具体表达式如下:

$$e_{100}^{sat} = 0.243e_L + 4.732e_0 - 2.089e_0^2 - 1.925 \quad (17)$$

$$e_{100}^{sat} - e_{1000}^{sat} = 2.300e_L - 1.014e_L^2 - 1.757 \left(\frac{e_0}{e_L}\right) + 0.801 \left(\frac{e_0}{e_L}\right)^2 \quad (18)$$

$$k = 1.037e_L - 0.456e_0 - 0.815 \left( \frac{e_0}{e_L} \right) + 0.516 \left( \frac{e_0}{e_L} \right)^2 \quad (19)$$

该模型相较现有经验公式的优势在于仅需基础物性参数即可计算湿陷系数。图 15 为 4 种代表性原状黄土饱和/非饱和压缩曲线测试与计算结果对比<sup>[6, 85, 90-91]</sup>。依据收集原状黄土基本物性指标, 4 种测试原状黄土的液限分别为 32%、18%、28% 和 40%, 初始孔隙比分别为 1.03, 0.84, 0.94, 1.38。此外, 上述原状黄土的压缩含水率从低(即: 2% 和 5%)到高(即: 饱和)。结果表明, 该模型对不同基本物性指标原状黄土的饱和与非饱和压缩曲线具有较好的预测效果。另一方面, 如图 16 所示, 预测压缩过程孔隙比的相对误差基本均在 20% 以内, 表明本研究提出模型表现较好。

图 17 对比了采用本文模型计算的湿陷系数与室内单线法试验结果。结果显示两者总体吻合良好, 验证了模型的有效性。但在较低浸水应力下, 试验测得湿陷系数为非零值, 而模型计算值却为零。这主要是由于模型假设应力低于饱和屈服应力时变形为完全弹性, 但实际土体在此阶段已可能发生不可逆塑性应变。

根据 ASTM D5333-03 标准<sup>[19]</sup>, 进一步对比了 200 kPa 下的湿陷指数的计算与试验值。结果表明, 模型在定性评判湿陷程度方面准确率超过 90%, 说明其在实际工程等级划分中具有较好的适用性。

### 4.2 机器学习模型

现有岩土工程应用主要采用两类机器学习方法, 即遗传算法(genetic algorithms, GAs)和人工神经网络(artificial neural networks, ANNs)。在 GAs 中, 多表达式编程(MEP)因具备代码复用及多解存储能力, 被认为较其他方法更具效率。MEP 通过五个主要步骤获取最优数学表达式, 如图 18(a)所示, 其工作流程包括<sup>[8, 99]</sup>: ①采用有放回抽样法从训练数据库中随机生成初始种群; ②通过基于适应度的二元竞赛从步骤①的初始种群中选择双亲个体; ③对步骤②选定的双亲个体进行交叉和变异以产生两个子代; ④采用步骤③生成的子代替换步骤①种群中适应度最差的个体; ⑤重复执行步骤(ii-iv)直至达到预设的迭代次数。

在 ANNs 中, 反向传播神经网络(BPNN)应用广泛且成熟, 其通过不断调整突触权重以降低预测值与实

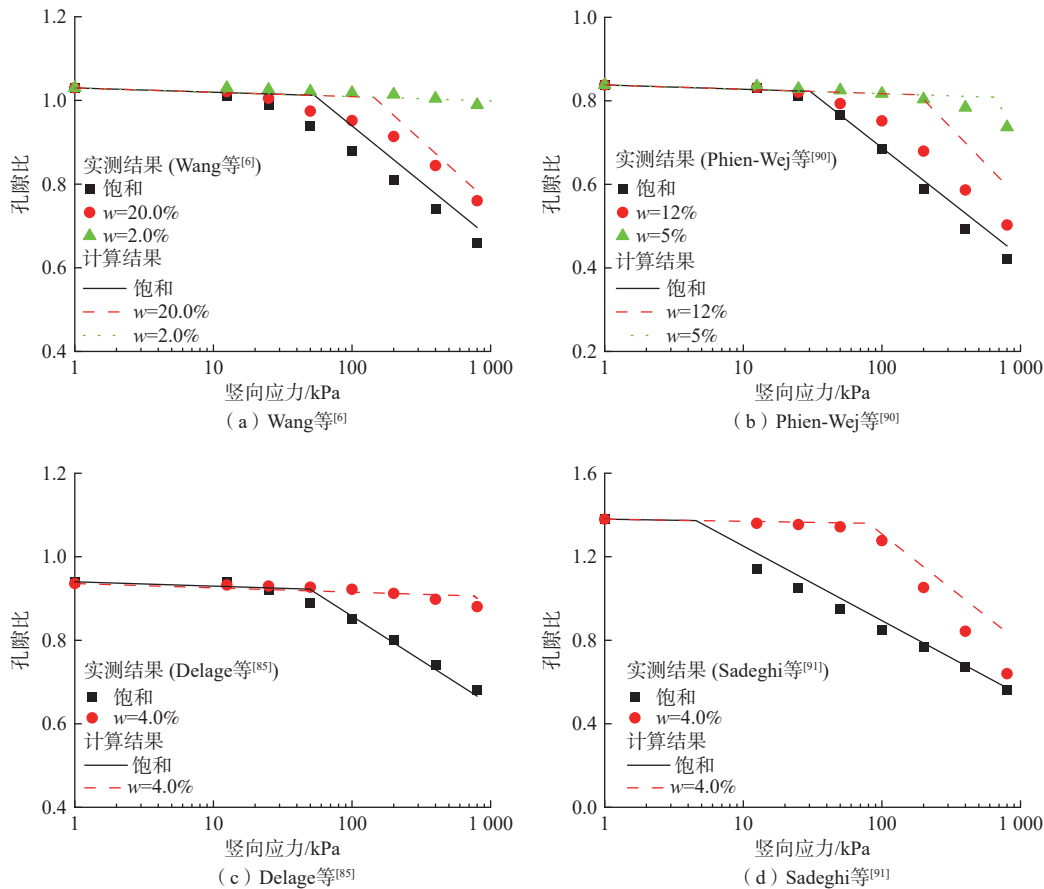


图 15 典型饱和/非饱和压缩曲线测试和计算结果对比

Fig. 15 Comparison of test and calculation results of typical saturated/unsaturated compression curves

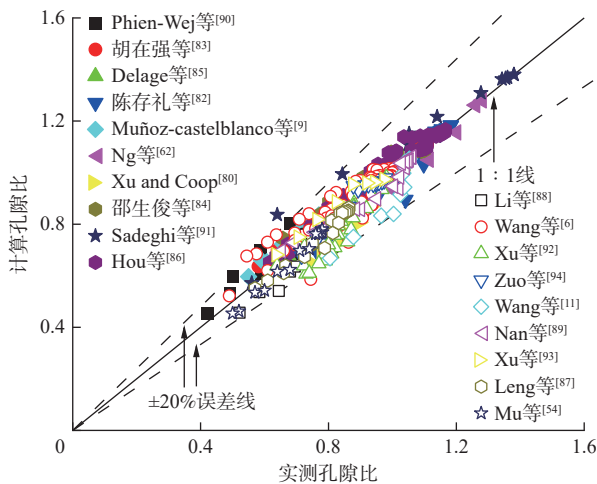


图 16 实测孔隙比与计算孔隙比对比<sup>[45]</sup>

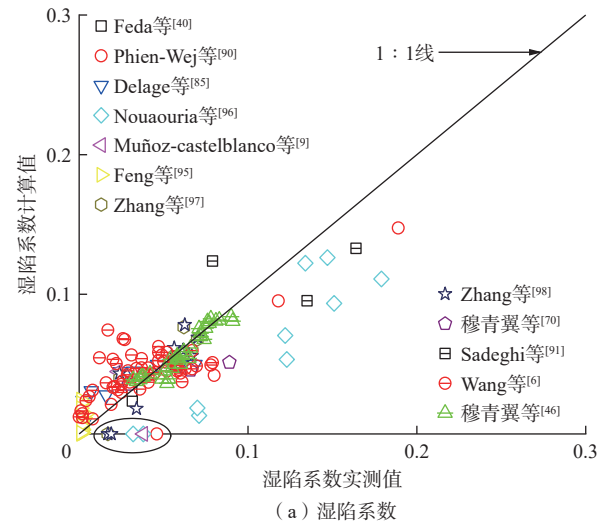
Fig. 16 Comparison of measured and calculated void ratios<sup>[45]</sup>

测值之间的误差,直至达到最优预测精度。如图 18(b)所示, BPNN 模型由输入层、隐藏层和输出层构成。其中,输入层为输入变量,输出层为输出结果,隐藏层则作为特征检测器的集合。BPNN 的运行过程主要包括五个步骤<sup>[100]</sup>: (i)随机生成权重,并分配至各输入变量; (ii)将步骤(i)获得的神经元值输入非线性传递函数; (iii)将步骤(ii)所得值突触权重; (iv)将步骤(iii)所得值输入线性传递函数并得到输出; (v)通过不断调整突触权重,重复上述步骤,直至预测值与实测值之间的误差达到最小。需要注意的是, BPNN 无法提供显式的数学表达式。

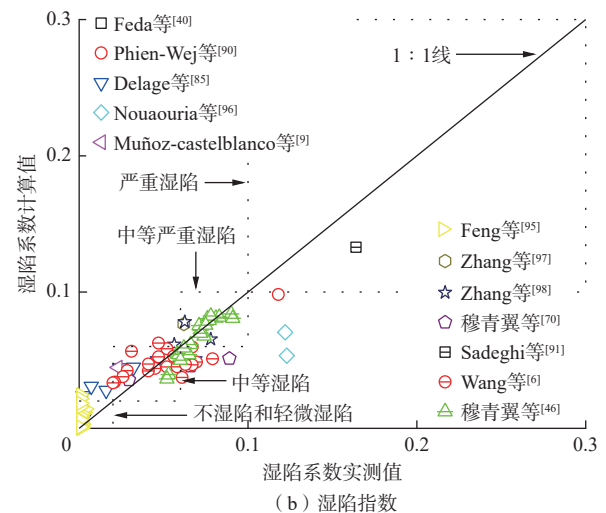
本研究选用了初始孔隙比  $e_0$ , 净竖向应力  $\sigma-u_a$ , 初始含水率  $w_0$ , 液限状态下孔隙比和塑性指数  $I_p$  作为 MEP 和 BPNN 算法的输入变量,并通过无量纲化得到 3 个参数 ( $a = \log(\sigma-u_a)$ ,  $b = e_0/e_L$ ,  $c = w_0/I_p$ )。根据上述步骤,结合 200 组试验数据,其中 100 组用于模型训练,另外 100 组用于模型预测。得到 MEP 算法的湿陷系数计算式:

$$I_c = \frac{c}{(c - 0.112b^2)^{(a-1)2b^2} + (17.86c^{\frac{2c}{b^2}})/b^2 + 2b^2 / [(a-1)2b^2]} \quad (20)$$

图 19 比较了使用式(20)计算得出的实测与预测湿陷系数和湿陷指数。训练组中预测值与实测值高度相关,其系数  $R^2$  高达 0.919,证明了 MEP 模型的高精度。测试组中  $R^2$ 、MAE 和 RMSE 值分别为 0.879, 0.008, 0.012。这些性能指标表明,基于 MEP 模型预测的湿陷势与测试数据库实测值吻合良好。此外,根据 ASTM D5333-03 标准<sup>[19]</sup>, MEP 模型在黄土湿陷程度分级中表现优异,训练库与测试库的准确率分别达到



(a) 湿陷系数



(b) 湿陷指数

图 17 弹性模型计算与实测的湿陷性<sup>[6, 9, 40, 46, 70, 85, 90, 91, 95 - 98]</sup>对比

Fig. 17 Comparisons of measured and calculated loess collapse<sup>[6, 9, 40, 46, 70, 85, 90, 91, 95 - 98]</sup>

94.1% 和 97.9%。误差数据在训练库和测试库中分别呈现为 3 个蓝色圆形标记和一个红色三角标记,但这些数据与分级界限的偏差均十分微小。

图 20(a)展示了利用 BPNN 预测的黄土湿陷系数与实测值的对比。训练集预测值与实测值高度相关,其  $R^2$  值高达 0.966,表明模型拟合效果良好。此外,与 MEP 方法相比, BPNN 在湿陷系数预测性能上更具优势,这体现在其更高的  $R^2$  值以及更低的 MAE 和 RMSE 值。图 21(b)进一步展示湿陷指数的预测结果,其中 BPNN 在训练集和测试集对黄土湿陷等级的分类准确率分别为 88.2% 和 89.6%,略低于 MEP 方法。

## 5 黄土湿陷原位评价方法

### 5.1 原位测试技术

如图 21 所示,采用 Campbell Scientific TDR200 时

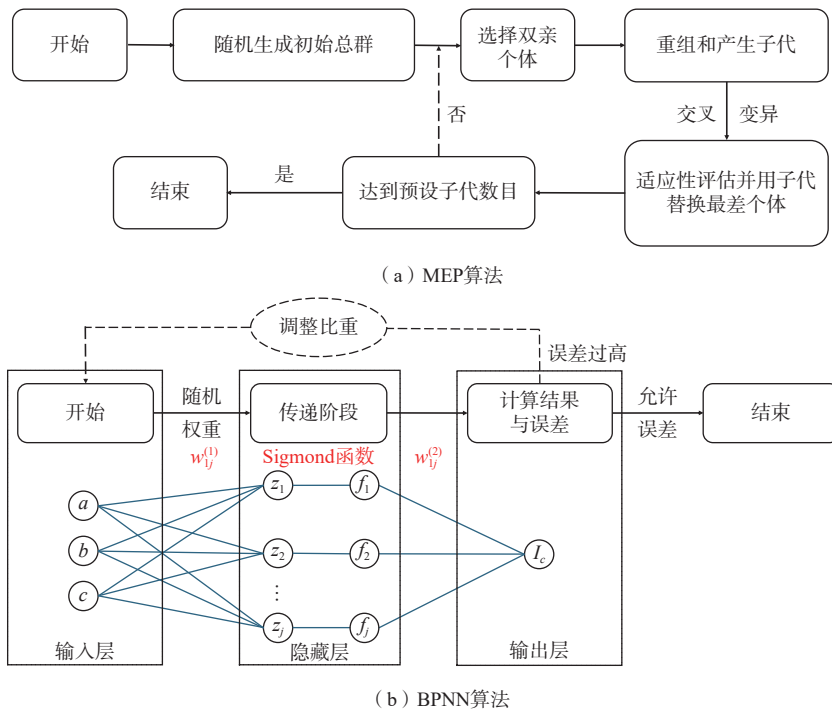


图 18 算法流程图<sup>[8]</sup>

Fig. 18 Algorithm Flowchart<sup>[8]</sup>

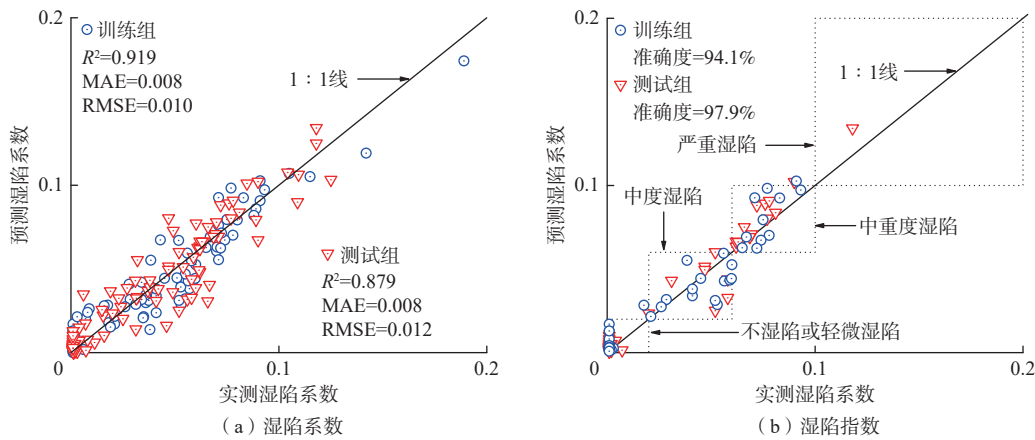


图 19 MEP 模型预测和实测湿陷性<sup>[8]</sup>

Fig. 19 Measured and calculated loess collapse by MEP model<sup>[8]</sup>

域反射仪搭配三针式 TDR 探头对土样进行电磁反射波测试。TDR200 连接 12V 恒压电源供电。三杆 TDR 探头由三根不锈钢杆组成, 杆件直径 6 mm、长度 150 mm, 相邻杆件中心间距 30 mm。根据 Zhan 等<sup>[49-50]</sup>提出的数值计算方法, 该探头的采样区近似呈现为长轴 36.6 mm、短轴 18.3 mm 的椭圆形态。图中蓝色区域表示 90% 测量敏感度范围, 该区域位于短半轴 18.3 mm、长半轴 36.6 mm 的椭圆内, 面积约 2,141mm<sup>2</sup>, 大于被测土体代表性单元。采用 50Ω 阻抗同轴电缆连接 TDR 探头与主机。

### 5.2 湿陷参数反演

采用介电常数平方根 ( $\sqrt{K_a}$ ) 与体积含水率 ( $\theta$ ) 之间的线性关系进行标定, 该模型广泛应用于低液限黏土 (如黄土和粉土) 的含水率测定<sup>[46, 48, 102-103]</sup>:

$$\theta = a\sqrt{K_a} + b \quad (21)$$

其中,  $a$  和  $b$  为拟合参数。

根据黄土试样介电常数测试结果与烘干法测得的真实体积含水率, 绘制  $\sqrt{K_a}$ - $\theta$  关系散点图, 并基于式 (21) 进行线性拟合。结果如图 22 所示, 三种黄土测试数据均与线性模型高度吻合, 拟合确定系数  $R^2$  达

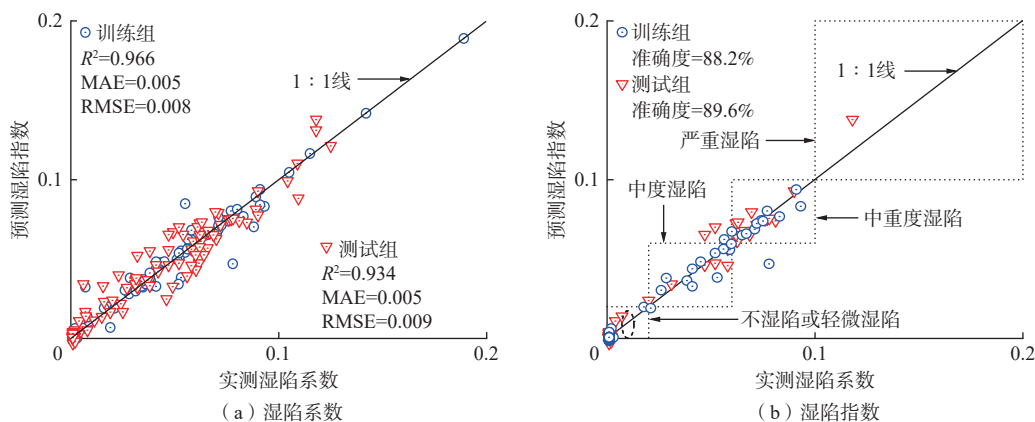


图 20 ANN 模型预测和实测湿陷性<sup>[8]</sup>

Fig. 20 Measured and calculated loess collapse by BPNN model<sup>[8]</sup>



图 21 TDR 原位测试设备图<sup>[100]</sup>

Fig. 21 In-situ TDR testing equipment<sup>[100]</sup>

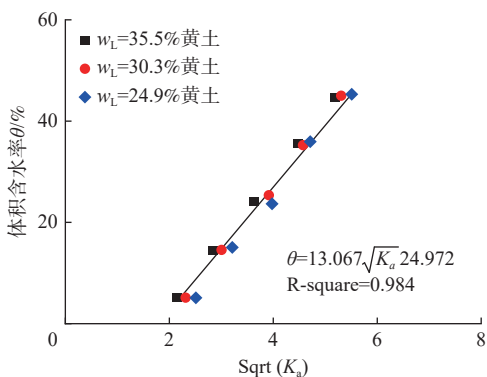


图 22 黄土介电常数和体积含水率经验关系标定<sup>[52]</sup>

Fig. 22 Calibration of relationship between dielectric constant and volumetric water content of loess<sup>[52]</sup>

到 0.984, 拟合参数  $a$  和  $b$  分别为 13.067 和 24.972。

图 23(a)展示了原位简易环刀法与室内标准环刀法在测定不同区域黄土湿密度时的误差对比。与室内标准环刀法相比,原位简易环刀法在测试中表现出较好的一致性,95%的湿密度测试数据相对误差控制在 $\pm 2\%$ 以内。值得注意的是,70%的原位简易环刀法测试结果略高于室内标准环刀法,这主要源于原位切入过程中环刀对土体产生的挤密作用更强。图 23(b)为采用 TDR 技术与室内烘干法测得的体积含水率之

间的误差分析。结果表明,基于介电常数-含水率经验关系,通过 TDR 测量可实现不同区域黄土体积含水率的准确反演,约 95% 的数据点绝对误差在 $\pm 3\%$ 以内。

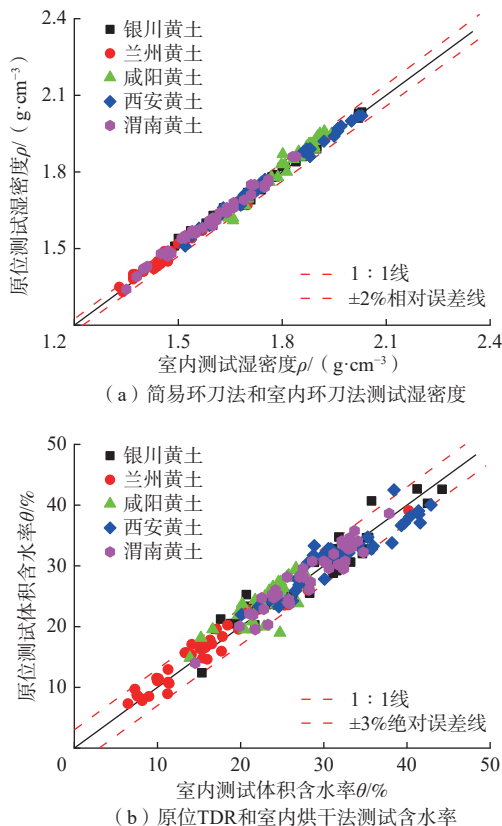


图 23 黄土湿密度与含水率误差分析<sup>[52]</sup>

Fig. 23 Error Analysis of Wet Density and Moisture Content of Loess<sup>[52]</sup>

### 5.3 湿陷评价

研究针对银川市、兰州市、咸阳市、西安市和渭南市的黄土场地展开了原位湿陷性测试。该地区黄土的液限范围为 19.6% ~ 39.9%, 塑限范围为 11.9% ~

23.2%, 孔隙比范围为 0.59 ~ 1.48, 质量含水率范围为 4.6% ~ 31.2%, 湿陷系数范围为 0 ~ 0.167, 湿陷试验时施加竖向应力范围为 200 ~ 600 kPa。图 24(a)展示了基于 MEP 模型得到的湿陷系数计算结果与试验值的对比, 图中以点划线标出了不同湿陷等级的界限值。结果表明, MEP 模型能够较好地预测黄土湿陷系数并判定其湿陷等级。从预测误差来看, 在轻微、中等和

强烈湿陷等级下, 90% 数据点的绝对误差分别控制在  $\pm 0.01$ 、 $\pm 0.03$  和  $\pm 0.06$  以内。在湿陷等级的定性判别方面, 200 组数据中存在 24 个误判点, 总体正确率为 88%。误判样本的分布为: 不湿陷类别 3 组, 轻微湿陷 9 组, 中等湿陷 10 组, 强烈湿陷 2 组。进一步按地区分析误判点发现: 银川市 7 组、兰州市 9 组、咸阳市 3 组、西安市 2 组、渭南市 3 组。可以看出,

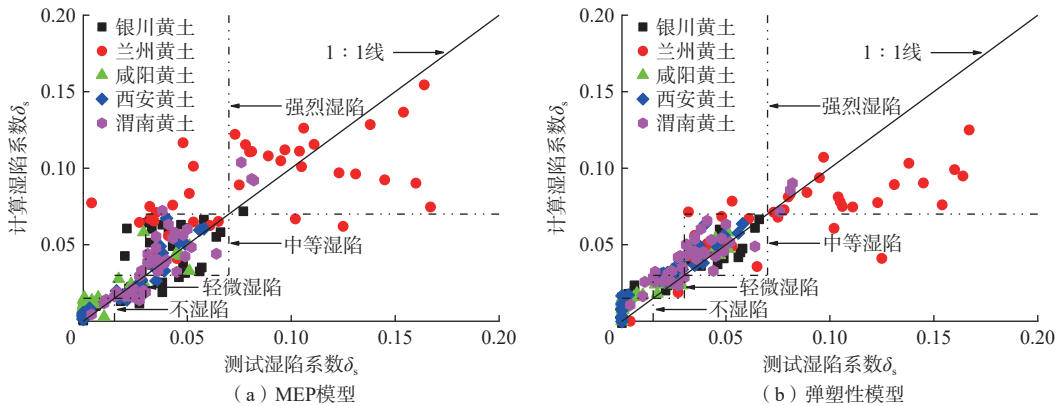


图 24 基于湿陷性计算模型的湿陷系数计算和测试结果对比<sup>[55]</sup>

Fig. 24 Comparisons of measured and calculated collapse potential<sup>[55]</sup>

MEP 模型在关中地区的判别精度较高, 而在陇西(含青海)及其他边缘地区表现稍逊。其原因为 MEP 算法具有较强的数据依赖性, 且训练数据主要来源于关中地区, 其他区域样本有限。后续需扩充训练样本量与地域覆盖范围, 以提升模型泛化能力。

图 24(b)为弹塑性模型的预测结果与试验值对比。在不同湿陷等级下, 90% 数据点的绝对误差分别为  $\pm 0.01$ (轻微)、 $\pm 0.02$ (中等)和  $\pm 0.06$ (强烈)。在湿陷程度等级判别方面, 200 组数据中出现 34 个误判点, 正确率为 83%, 具体包括: 不湿陷 12 组、轻微湿陷 17 组、中等湿陷 2 组、强烈湿陷 3 组。误判样本的地区分布为: 银川市 5 组、兰州市 5 组、咸阳市 6 组、西安市 10 组、渭南市 8 组。相比 MEP 模型, 弹塑性模型的判别性能略低, 尤其在西安市与渭南市部分场地误差显著。这是由于该模型基于弹塑性理论构建, 其对状态参数(如含水率与孔隙比)变化较为敏感, 这些参数的微小波动易引起湿陷系数计算偏差, 在低湿陷性黄土中尤为明显<sup>[55]</sup>。

## 6 结论

本文系统综述了湿陷性黄土微观结构、水-力学特性、本构模型与简化方法, 并提出了一种结合时域

反射技术与湿陷模型的原位湿陷快速评价技术。主要结论如下:

(1) 微观结构与水-力特性: 原状黄土以黏粒与矿物胶结为主, 内部存在大量巨孔结构, 在增湿或加载条件下易发生塌陷; 相比之下, 压实与重塑黄土结构更为均质, 湿陷性显著降低。黄土的持水特性、压缩及剪切行为均受吸力与结构性的协同控制, 高吸力下强度增强, 而湿化过程则导致显著软化。

(2) 本构模型与简化方法: 建立了可统一描述黏粒主导型、矿物主导型及混合型三类结构状态, 并考虑结构退化效应的非饱和和结构性黄土本构模型。基于弹塑性理论的简化计算模型利用归一化压缩曲线实现湿陷系数的高效求解, 计算过程仅依赖 4 个基本参数(初始孔隙比、初始及含水率、液限孔隙比及当前应力), 具有显著的工程实用价值。

(3) 机器学习与原位评价: 基于 MEP 的机器学习模型在湿陷系数预测与等级判别方面表现优异, 训练集与测试集准确率分别达 94.1% 与 97.9%。结合 TDR 技术可实现黄土含水率与密度的原位快速获取, 为湿陷性评价提供了高效、经济的技术路径。

本研究构建的“理论模型-简化算法-原位测试”一体化评价体系, 显著提升了黄土湿陷性评价的效率与

精度。未来研究需进一步拓展样本覆盖范围,增强模型泛化能力,并推动多技术融合与智能化评价系统的实际工程应用。

### 参考文献 (References) :

- [ 1 ] 陈天然,肖国桥,林欣如,等.中国黄土磁性地层研究进展与展望[J].海洋地质与第四纪地质,2024,44(2):1-15. [ CHEN Tianran, XIAO Guoqiao, LIN Xinru, et al. Progress and outlooks on magnetostratigraphy of Chinese loess[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2024, 44(2): 1-15. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 2 ] 王丽琴,邵生俊.黄土构度与物理指标之间的定量关系[J].岩石力学与工程学报,2015,34(增刊2):4380-4386. [ WANG Liqin, SHAO Shengjun. Quantitative relationship between structural and physical indexes of loess[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(Sup2): 4380-4386. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 3 ] 周凤玺,周志雄,邵生俊.非饱和黄土的增湿湿陷变形特性分析[J].岩土工程学报,2021,43(增刊1):36-40. [ ZHOU Fengxi, ZHOU Zhixiong, SHAO Shengjun. Analysis of wetting-induced collapse deformation characteristics of unsaturated loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(Sup1): 36-40. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 4 ] PENG Jianbing, QI Shengwen, WILLIAMS A, et al. Preface to the special issue on "Loess engineering properties and loess geohazards"[J]. Engineering Geology, 2018, 236: 1-3.
- [ 5 ] PENG Jianbing, WANG Gonghui, WANG Qiyao, et al. Shear wave velocity imaging of landslide debris deposited on an erodible bed and possible movement mechanism for a loess landslide in Jingyang, Xi'an, China[J]. Landslides, 2017, 14(4): 1503-1512.
- [ 6 ] WANG Liqin, SHAO Shengjun, SHE Fangtao. A new method for evaluating loess collapsibility and its application[J]. Engineering Geology, 2020, 264: 105376.
- [ 7 ] HAERI S M, KHOSRAVI A, GARAKANI A A, et al. Effect of soil structure and disturbance on hydromechanical behavior of collapsible loessial soils[J]. International Journal of Geomechanics, 2017, 17(1): 04016021.
- [ 8 ] MU Qingyi, SONG Tianqi, LU Zhao, et al. Evaluation of the collapse susceptibility of loess using machine learning[J]. Transportation Geotechnics, 2024, 48: 101327.
- [ 9 ] MUÑOZ-CASTELBLANCO J, DELAGE P, PEREIRA J M, et al. Some aspects of the compression and collapse behaviour of an unsaturated natural loess[J]. Géotechnique Letters, 2011, 1(2): 17-22.
- [ 10 ] PENG Jianbing, TONG Xiao, WANG Shaokai, et al. Three-dimensional geological structures and sliding factors and modes of loess landslides[J]. Environmental Earth Sciences, 2018, 77(19): 675.
- [ 11 ] WANG Jiading, XU Yuanjun, MA Yan, et al. Study on the deformation and failure modes of filling slope in loess filling engineering: A case study at a loess mountain airport[J]. Landslides, 2018, 15(12): 2423-2435.
- [ 12 ] ZHANG Hongxue, ZENG Runqiang, ZHANG Yi, et al. Subsidence monitoring and influencing factor analysis of mountain excavation and valley infilling on the Chinese Loess Plateau: A case study of Yan'an New District[J]. Engineering Geology, 2022, 297: 106482.
- [ 13 ] 李俊,卢大玮,李家春.湿陷性黄土地区高速铁路路基沉降预警研究[J].路基工程,2014(3):95-99. [ LI Jun, LU Dawei, LI Jiachun. Study on early warning for subgrade settlement of high-speed railway in collapsible loess regions[J]. Subgrade Engineering, 2014(3): 95-99. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 14 ] 杨校辉,钱豹,郭楠,等.某黄土填方地基不均匀沉降影响因素及长期变形规律研究[J].岩土工程学报,2022,44(增刊1):207-212. [ YANG Xiaohui, QIAN Bao, GUO Nan, et al. Influence factors and deformation laws of uneven settlement of a loess-filling foundation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(Sup1): 207-212. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 15 ] 中华人民共和国住房和城乡建设部,国家市场监督管理总局.湿陷性黄土地区建筑标准:GB 50025—2018[S].北京:中国建筑工业出版社,2018. [ Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation. Standard for building construction in collapsible loess regions: GB 50025—2018[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2018. (in Chinese) ]
- [ 16 ] MU Qingyi, MENG Longlong, LU Zhao, et al. Hydro-mechanical behavior of unsaturated intact paleosol and intact loess[J]. Engineering Geology, 2023, 323: 107245.

- [ 17 ] HOU Xiaokun, QI Shengwen, LI Tonglu, et al. Microstructure and soil-water retention behavior of compacted and intact silt loess[J]. *Engineering Geology*, 2020, 277: 105814.
- [ 18 ] ZHANG J W, MU Q Y, GARG A, et al. Shear behavior of unsaturated intact and compacted loess: A comparison study[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2020, 79(3): 79.
- [ 19 ] Standard test method for measurement of collapse potential of soils: ASTM D5333-03[S]. West Conshohocken: ASTM, 2003.
- [ 20 ] MATYAS E L, RADHAKRISHNA H S. Volume change characteristics of partially saturated soils[J]. *Géotechnique*, 1968, 18(4): 432 – 448.
- [ 21 ] HANZAWA H, FUKAYA T, SUZUKI K. Evaluation of engineering properties for an ariake clay[J]. *Soils and Foundations*, 1990, 30(4): 11 – 24.
- [ 22 ] PEREIRA J H F, FREDLUND D G. Volume change behavior of collapsible compacted gneiss soil[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2000, 126(10): 907 – 916.
- [ 23 ] YAGHOUBI E, DISFANI M M, ARULRAJAH A, et al. A prediction model for the loading-wetting volumetric behavior of unsaturated granular materials[J]. *Soils and Foundations*, 2021, 61(3): 623 – 641.
- [ 24 ] ZHANG Xiong, LYTTON R L. Modified state-surface approach to the study of unsaturated soil behavior. Part III: Modeling of coupled hydromechanical effect[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2012, 49(1): 98 – 120.
- [ 25 ] ALONSO E E, GENS A, JOSA A. A constitutive model for partially saturated soils[J]. *Géotechnique*, 1990, 40(3): 405 – 430.
- [ 26 ] YAO Y P, HOU W, ZHOU A N. UH model: Three-dimensional unified hardening model for overconsolidated clays[J]. *Géotechnique*, 2009, 59(5): 451 – 469.
- [ 27 ] LUO Ting, CHEN Dong, YAO Yangping, et al. An advanced UH model for unsaturated soils[J]. *Acta Geotechnica*, 2020, 15(1): 145 – 164.
- [ 28 ] YAO Y P, NIU L, CUI W J. Unified hardening (UH) model for overconsolidated unsaturated soils[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2014, 51(7): 810 – 821.
- [ 29 ] CHIU C F, NG C W W. A state-dependent elasto-plastic model for saturated and unsaturated soils[J]. *Géotechnique*, 2003, 53(9): 809 – 829.
- [ 30 ] GALLIPOLI D, GENS A, SHARMA R, et al. An elasto-plastic model for unsaturated soil incorporating the effects of suction and degree of saturation on mechanical behaviour[J]. *Géotechnique*, 2003, 53(1): 123 – 135.
- [ 31 ] WHEELER S J, SHARMA R S, BUISSON M S R. Coupling of hydraulic hysteresis and stress-strain behaviour in unsaturated soils[J]. *Géotechnique*, 2003, 53(1): 41 – 54.
- [ 32 ] ZHANG Yue, ZHOU Annan, NAZEM M, et al. Finite element implementation of a fully coupled hydro-mechanical model and unsaturated soil analysis under hydraulic and mechanical loads[J]. *Computers and Geotechnics*, 2019, 110: 222 – 241.
- [ 33 ] ZHOU Annan, SHENG Daichao, SLOAN S W, et al. Interpretation of unsaturated soil behaviour in the stress-Saturation space, I: Volume change and water retention behaviour[J]. *Computers and Geotechnics*, 2012, 43: 178 – 187.
- [ 34 ] MU Qingyi, DAI Baolin, ZHOU Chao. A constitutive model for structured soils under saturated and unsaturated conditions[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2023, 47(14): 2562 – 2586.
- [ 35 ] COTECCHIA F, CHANDLER R J. One-dimensional compression of a natural clay: Structural changes and mechanical effects[C]//2nd International Symposium on Hard Soils-Soft Rocks. Rotterdam: A. A. Balkema, 1998: 103-114.
- [ 36 ] YAN W M, LI X S. A model for natural soil with bonds[J]. *Géotechnique*, 2011, 61(2): 95 – 106.
- [ 37 ] DENISOV N Y. Mechanical properties of loess and loams[M]. Moscow: Gosstroizdat, 1951.
- [ 38 ] HOLTZ W G, HILLF J W. Settlement of soil foundations due to saturation[C]//Proceedings of the 5th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. London: ISSMGE, 1961: 673-679.
- [ 39 ] GIBBS H J, BARA J P. Predicting surface subsidence from basic soil tests[M]//BROWN P P, SHOCKLEY W G. Field testing of soils. Philadelphia: ASTM, 1962: 231-247.
- [ 40 ] FEDA J. Structural stability of subsident loess soil from Praha-Dejvice[J]. *Engineering Geology*, 1966, 1(3): 201 – 219.
- [ 41 ] BASMA A A, TUNCER E R. Evaluation and control of collapsible soils[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1992, 118(10): 1491 – 1504.
- [ 42 ] HOUSTON S L, HOUSTON W N, SPADOLA D J. Prediction of field collapse of soils due to wetting[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1988, 114(1):

- 40 – 58.
- [ 43 ] LIM Y Y, MILLER G A. Wetting-induced compression of compacted Oklahoma soils[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2004, 130(10): 1014 – 1023.
- [ 44 ] 邵生俊, 杨春鸣, 马秀婷, 等. 黄土的独立物性指标及其与湿陷性参数的相关性分析 [J]. 岩土力学, 2013, 34(增刊 2): 27 – 34. [ SHAO Shengjun, YANG Chunming, MA Xiuting, et al. Correlation analysis of collapsible parameters and independent physical indices of loess[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(Sup2): 27 – 34. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 45 ] MU Q Y, DAI B L, ZHOU C, et al. A new and simple method for predicting the collapse susceptibility of intact loess[J]. Computers and Geotechnics, 2023, 158: 105408.
- [ 46 ] 穆青翼, 郑建国, 于永堂, 等. 基于时域反射技术 (TDR) 的黄土湿陷原位评价研究 [J]. 岩土工程学报, 2022, 44(6): 1115 – 1123. [ MU Qingyi, ZHENG Jianguo, YU Yongtang, et al. In-situ evaluation of collapsible loess through time-domain reflectometry[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(6): 1115 – 1123. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 47 ] LIN C P, TANG S H, CHUNG C C. Development of TDR penetrometer through theoretical and laboratory investigations: 1. Measurement of Soil dielectric permittivity[J]. Geotechnical Testing Journal, 2006, 29(4): 306 – 313.
- [ 48 ] MU Q Y, ZHAN L T, LIN C P, et al. Non-invasive time domain reflectometry probe for transient measurement of water retention curves in structured soils[J]. Engineering Geology, 2020, 264: 105335.
- [ 49 ] ZHAN Liangtong, MU Qingyi, CHEN Yunmin, et al. Experimental study on applicability of using time-domain reflectometry to detect NAPLs contaminated sands[J]. Science China Technological Sciences, 2013, 56(6): 1534 – 1543.
- [ 50 ] ZHAN T L T, MU Qingyi, CHEN Yunmin, et al. Evaluation of measurement sensitivity and design improvement for time domain reflectometry penetrometers[J]. Water Resources Research, 2015, 51(4): 2994 – 3006.
- [ 51 ] ZHANG Nan, YU Xinbao, PRADHAN A. Application of a thermo-time domain reflectometry probe in sand-kaolin clay mixtures[J]. Engineering Geology, 2017, 216: 98 – 107.
- [ 52 ] 张继文, 穆青翼, 孟龙龙, 等. 一种黄土湿陷性原位评价技术 [J]. 土木工程学报, 2023, 56(增刊 1): 90 – 97. [ ZHANG Jiwen, MU Qingyi, MENG Longlong, et al. An *in-situ* evaluation technique for collapsible loess[J]. China Civil Engineering Journal, 2023, 56(Sup1): 90 – 97. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 53 ] MU Q Y, ZHOU C, NG C W W. Compression and wetting induced volumetric behavior of loess: Macro- and micro-investigations[J]. Transportation Geotechnics, 2020, 23: 100345.
- [ 54 ] MU Q Y, DONG H, LIAO H J, et al. Effects of in situ wetting-drying cycles on the mechanical behaviour of an intact loess[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2022, 59(7): 1281 – 1284.
- [ 55 ] ZHUANG Jianqi, PENG Jianbing, ZHU Yi, et al. The internal erosion process and effects of undisturbed loess due to water infiltration[J]. Landslides, 2021, 18(2): 629 – 638.
- [ 56 ] DELAGE P, AUDIGUIER M, CUI Yujun, et al. Microstructure of a compacted silt[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1996, 33(1): 150 – 158.
- [ 57 ] MU Q Y, MENG L L, ZHOU C. Stress-dependent water retention behaviour of two intact aeolian soils with multimodal pore size distributions[J]. Engineering Geology, 2023, 323: 107233.
- [ 58 ] NG C W W, MU Q Y, ZHOU C. Effects of specimen preparation method on the volume change of clay under cyclic thermal loads[J]. Géotechnique, 2018, 69(2): 146 – 150.
- [ 59 ] MU Q Y, DONG H, LIAO H J, et al. Water-retention curves of loess under wetting-drying cycles[J]. Géotechnique Letters, 2020, 10(2): 135 – 140.
- [ 60 ] MU Qingyi, MENG Longlong, SHEN Yanqian, et al. Effects of clay content on the desiccation cracking behavior of low-plasticity soils[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2023, 82(8): 317.
- [ 61 ] MU Qingyi, NG C W W, ZHOU Chao, et al. Effects of clay content on the volumetric behavior of loess under heating-cooling cycles[J]. Journal of Zhejiang University-Science A, 2019, 20(12): 979 – 990.
- [ 62 ] NG C W W, SADEGHI H, HOSSEN S K B, et al. Water retention and volumetric characteristics of intact and re-compacted loess[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2016, 53(8): 1258 – 1269.
- [ 63 ] TARANTINO A. A water retention model for

- deformable soils[J]. *Géotechnique*, 2009, 59(9): 751 – 762.
- [ 64 ] MU Q Y, NG C W W, ZHOU C, et al. A new model for capturing void ratio-dependent unfrozen water characteristics curves[J]. *Computers and Geotechnics*, 2018, 101: 95 – 99.
- [ 65 ] NG C W W, XU J, YUNG S Y. Effects of wetting–drying and stress ratio on anisotropic stiffness of an unsaturated soil at very small strains[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2009, 46(9): 1062 – 1076.
- [ 66 ] ROMERO E, DELLA VECCHIA G, JOMMI C. An insight into the water retention properties of compacted clayey soils[J]. *Géotechnique*, 2011, 61(4): 313 – 328.
- [ 67 ] NG C W W, PANG Y W. Experimental investigations of the soil-water characteristics of a volcanic soil[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2000, 37(6): 1252 – 1264.
- [ 68 ] 陈存礼, 张登飞, 张洁, 等. 等向应力下原状黄土的压缩及增湿变形特性研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2017, 36(7): 1736 – 1747. [ CHEN Cunli, ZHANG Dengfei, ZHANG Jie, et al. Compression and wetting deformation behavior of intact loess under isotropic stresses[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2017, 36(7): 1736 – 1747. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 69 ] ASSALLAY A M, ROGERS C D F, SMALLEY I J. Formation and collapse of metastable particle packings and open structures in loess deposits[J]. *Engineering Geology*, 1997, 48(1/2): 101 – 115.
- [ 70 ] 穆青翼, 党影杰, 董琪, 等. 原状和压实黄土持水特性及湿陷性对比试验研究 [J]. *岩土工程学报*, 2019, 41(8): 1496 – 1504. [ MU Qingyi, DANG Yingjie, DONG Qi, et al. Water-retention characteristics and collapsibility behaviors: Comparison between intact and compacted loesses[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2019, 41(8): 1496 – 1504. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 71 ] 王娇, 邵生俊, 陈攀. 非饱和重塑黄土的土水特性及压缩屈服与湿陷性的研究 [J]. *岩土力学*, 2017, 38(增刊 2): 217 – 222. [ WANG Jiao, SHAO Shengjun, CHEN Pan. Soil-water characteristics, compressive yield and collapsibility of unsaturated remolded loess[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, 38(Sup2): 217 – 222. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 72 ] NG C W W, MU Q Y, ZHOU C. Effects of soil structure on the shear behaviour of an unsaturated loess at different suctions and temperatures[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2017, 54(2): 270 – 279.
- [ 73 ] NG C W W, ZHOU C. Cyclic behaviour of an unsaturated silt at various suctions and temperatures[J]. *Géotechnique*, 2014, 64(9): 709 – 720.
- [ 74 ] ZHAN T L T, NG C W W. Shear strength characteristics of an unsaturated expansive clay[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2006, 43(7): 751 – 763.
- [ 75 ] ARROYO M, AMARAL M, ROMERO E, et al. Isotropic yielding of unsaturated cemented silty sand[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2013, 50(8): 807 – 819.
- [ 76 ] ZHANG Dengfei, WANG Jiading, CHEN Cunli, et al. The compression and collapse behaviour of intact loess in suction-monitored triaxial apparatus[J]. *Acta Geotechnica*, 2020, 15(2): 529 – 548.
- [ 77 ] KOLIJI A, LALLOUI L, VULLIET L. Constitutive modeling of unsaturated aggregated soils[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2010, 34(17): 1846 – 1876.
- [ 78 ] LIU M D, CARTER J P. A structured Cam Clay model[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2002, 39(6): 1313 – 1332.
- [ 79 ] XU L, COOP M P. Influence of structure on the behavior of a saturated clayey loess[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2016, 53(6): 1026 – 1037.
- [ 80 ] BURLAND J B. On the compressibility and shear strength of natural clays[J]. *Géotechnique*, 1990, 40(3): 329 – 378.
- [ 81 ] GALLIPOLI D, BRUNO A W. A bounding surface compression model with a unified virgin line for saturated and unsaturated soils[J]. *Géotechnique*, 2017, 67(8): 703 – 712.
- [ 82 ] 陈存礼, 胡再强, 高鹏. 原状黄土的结构性及其与变形特性关系研究 [J]. *岩土力学*, 2006, 27(11): 1891 – 1896. [ CHEN Cunli, HU Zaiqiang, GAO Peng. Research on relationship between structure and deformation property of intact loess[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2006, 27(11): 1891 – 1896. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 83 ] 胡再强, 沈珠江, 谢定义. 结构性黄土的变形特性 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(24): 4142 – 4146. [ HU Zaiqiang, SHEN Zhujiang, XIE Dingyi. Deformation properties of structural loess[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(24): 4142 – 4146. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 84 ] 邵生俊, 王丽琴, 邵帅, 等. 黄土的结构屈服及湿陷

- 变形的分析[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(8): 1357 – 1365. [ SHAO Shengjun, WANG Liqin, SHAO Shuai, et al. Structural yield and collapse deformation of loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(8): 1357 – 1365. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 85 ] DELAGE P, CUI Y J, ANTOINE P. Geotechnical problems related with loess deposits in northern France[C]//Proceedings of the International Conference on Problematic Soils. [S.l.]: [s.n.], 2005: 517 – 540.
- [ 86 ] HOU Xiaokun, VANAPALLI S K, LI Tonglu. Wetting-induced collapse behavior associated with infiltration: A case study[J]. Engineering Geology, 2019, 258: 105146.
- [ 87 ] LENG Yanqiu, PENG Jianbing, WANG Shuo, et al. Development of water sensitivity index of loess from its mechanical properties[J]. Engineering Geology, 2021, 280: 105918.
- [ 88 ] LI Xian, LI Lincui, SONG Yanxun, et al. Characterization of the mechanisms underlying loess collapsibility for land-creation project in Shaanxi Province, China—a study from a micro perspective[J]. Engineering Geology, 2019, 249: 77 – 88.
- [ 89 ] NAN Jingjing, PENG Jianbing, ZHU Fengji, et al. Multiscale characteristics of the wetting deformation of Malan loess in the Yan'an area, China[J]. Journal of Mountain Science, 2021, 18(4): 1112 – 1130.
- [ 90 ] PHIEN-WEJ N, PIENTONG T, BALASUBRAMANIAM A S. Collapse and strength characteristics of loess in Thailand[J]. Engineering Geology, 1992, 32(1/2): 59 – 72.
- [ 91 ] SADEGHI H, KIANI M, SADEGHI M, et al. Geotechnical characterization and collapsibility of a natural dispersive loess[J]. Engineering Geology, 2019, 250: 89 – 100.
- [ 92 ] XU L, GAO C, LAN T, et al. Influence of grading on the compressibility of saturated loess soils[J]. Géotechnique Letters, 2020, 10(2): 198 – 204.
- [ 93 ] XU Ling, LAN Tiangang, MU Qingyi, et al. Effects of structure on the compression behavior of unsaturated loess[J]. International Journal of Geomechanics, 2021, 21(4): 06021007.
- [ 94 ] ZUO Lu, XU Ling, BAUDET B A, et al. The structure degradation of a silty loess induced by long-term water seepage[J]. Engineering Geology, 2020, 272: 105634.
- [ 95 ] FENG Shijin, SHI Zhenming, SHEN Yang, et al. Elimination of loess collapsibility with application to construction and demolition waste during dynamic compaction[J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 73(9): 5317 – 5332.
- [ 96 ] NOUAOURIA M S, GUENFOUD M, LAFIFI B. Engineering properties of loess in Algeria[J]. Engineering Geology, 2008, 99(1/2): 85 – 90.
- [ 97 ] ZHANG Yao, HU Zaiqiang, LI Lei, et al. Improving the structure and mechanical properties of loess by acid solutions—an experimental study[J]. Engineering Geology, 2018, 244: 132 – 145.
- [ 98 ] ZHANG Yao, HU Zaiqiang, XUE Zhijia. A new method of assessing the collapse sensitivity of loess[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2018, 77(4): 1287 – 1298.
- [ 99 ] JALAL F E, XU Yongfu, IQBAL M, et al. Predicting the compaction characteristics of expansive soils using two genetic programming-based algorithms[J]. Transportation Geotechnics, 2021, 30: 100608.
- [ 100 ] FABANI M P, CAPOSSIO J P, ROMÁN M C, et al. Producing non-traditional flour from watermelon rind pomace: Artificial neural network (ANN) modeling of the drying process[J]. Journal of Environmental Management, 2021, 281: 111915.
- [ 101 ] ZHOU Zhiyong, LI Lin, YU Wentao, et al. Development of soil type-independent calibration relationships for water content and dry density measurements using time-domain reflectometry[J]. Frontiers in Built Environment, 2025, 11: 1653550.
- [ 102 ] 詹良通, 穆青翼, 陈云敏. 三针式 TDR 探头测试区域范围分析及试验验证 [J]. 岩土工程学报, 2014, 36(4): 757 – 762. [ ZHAN Liangtong, MU Qingyi, CHEN Yunmin. Analysis and experimental verification of sampling area of three-rod time-domain reflectometry probe[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(4): 757 – 762. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 103 ] MU Q Y, ZHOU C, NG C W W, et al. Stress effects on soil freezing characteristic curve: Equipment development and experimental results[J]. Vadose Zone Journal, 2019, 18(1): 180199.