

引文格式:黄 华,刘瑞阳,刘笑笑,等.黄土湿陷特性及其改性方法研究进展[J].建筑科学与工程学报,2024,41(2):1-16.

HUANG Hua, LIU Ruiyang, LIU Xiaoxiao, et al. Research progress on collapsible characteristics of loess and its modification methods[J].

Journal of Architecture and Civil Engineering, 2024, 41(2): 1-16.

DOI:10.19815/j.jace.2023.08056

黄土湿陷特性及其改性方法研究进展

黄 华¹, 刘瑞阳¹, 刘笑笑², 柳明亮^{2,3}

(1. 西安工业大学 建筑工程学院, 陕西 西安 710021; 2. 长安大学 建筑工程学院, 陕西 西安 710061;

3. 陕西省建筑科学研究院有限公司, 陕西 西安 710082)

摘要:为了减小黄土湿陷性引起的一系列地质灾害方面的危害,对现阶段黄土湿陷性的研究成果进行了梳理和分析,总结了黄土湿陷微观研究中3种主流研究方法取得的部分重要成果,剖析了国内外黄土湿陷的评价方法及其侧重差异,归纳了湿陷性黄土的改性方法,并对未来黄土湿陷微观机理和湿陷性评价的研究进行了展望。结果表明:黄土湿陷的根本原因是其本身具有独特的架空结构,黄土遇水后架空结构中的部分黏粒发生水化膨胀导致颗粒滑移且随着含水率达到阈值,黄土结构中连接薄弱处将首先发生破坏,因此其稳定性受含水率的影响显著;目前基于多元线性回归法、偏最小二乘法等方法建立了许多关于黄土湿陷性和各项物理指标、土层埋深以及微观结构参数之间关系的湿陷性评价理论;针对黄土湿陷量计算值和实测值之间的差异,学者提出了修正系数、湿陷性土不连续分布效应系数等参数进行修正;湿陷性黄土的改性方法可以分为物理改性和化学改性两类,浸水法、深层强夯法等物理改性方法通过使土的孔隙结构和颗粒排列方式发生改变进而实现改性,而化学改性加固中添加的各类固化剂会同黄土中的水和可溶性盐类发生一系列反应,增加黄土中的黏粒和胶结物含量,进而实现对黄土各项性质的改善。

关键词:黄土;湿陷性;湿陷微观机理;湿陷性评价;改性

中图分类号:TU44

文献标志码:A

文章编号:1673-2049(2024)02-0001-16

Research progress on collapsible characteristics of loess and its modification methods

HUANG Hua¹, LIU Ruiyang¹, LIU Xiaoxiao², LIU Mingliang^{2,3}

(1. School of Civil and Architecture Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, Shaanxi, China;

2. School of Civil and Architecture Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, Shaanxi, China;

3. Shaanxi Architecture Science Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710082, Shaanxi, China)

Abstract: In order to reduce the hazards of a series of geological disasters caused by loess collapsibility, the research results of loess collapsibility at the present stage were sorted out and analyzed, some of the important results obtained by the three mainstream research methods in the microscopic study of loess collapsibility were summarized, the evaluation methods of loess collapsibility at home and abroad and their focus on the differences were analyzed, the modification methods of collapsible loess were summarized and the prospect of the future research

收稿日期:2023-08-13

投稿网址: <http://jace.chd.edu.cn>

基金项目:陕西省杰出青年科学基金项目(2023-JC-JQ-47);陕西省国际科技合作计划项目(2024GH-ZDXM-18);

陕西高校青年创新团队建设项目(2023);西安市科技计划项目(23GXFW0035)

作者简介:黄 华(1979-),男,工学博士,教授,博士生导师, E-mail: huanghua23247@163.com.

of the microscopic mechanisms of loess collapse and the evaluation of collapsibility was provided. The results show that the root cause of the collapsibility of loess is its own unique bracket structure, when loess is exposed to water, some of the clay particles in the bracket structure undergo hydration and expansion, leading to particle slippage, and as the water content reaches the threshold, the weak connections in the loess structure will be the first to be damaged so the stability of the bracket structure is significantly affected by the water content. At present, based on the multiple linear regression method, the partial least squares method, and other methods, a lot of collapsibility evaluation theories have been established on the relationship between loess collapsibility and various physical indexes, soil layer depth, and microstructure parameters. Aiming at the difference between the calculated value and measured value of loess collapsibility, scholars propose correction coefficients, discontinuous distribution effect coefficients of collapsible loess, and other parameters for correction. The modification methods of collapsible loess can be divided into two categories: physical modification and chemical modification. Physical modification methods such as the water immersion method and the deep ramming method realize modification by changing the pore structure and particle arrangement of the soil. The various kinds of curing agents added in chemical modification reinforcement will have a series of reactions with water and soluble salts in loess, increasing the content of clay particles and cement in loess and thus realizing the improvement of various properties of loess.

Key words: loess; collapsibility; microscopic mechanism of collapse; collapsibility evaluation; modification

Author resume: HUANG Hua(1979-), male, PhD, professor, E-mail: huanghua23247@163. com.

0 引言

黄土是一种松散的风成沉积物,通常具有均质多孔的结构^[1]。在中国湿陷性黄土分布广泛,面积达 $38 \times 10^4 \text{ km}^2$,其中有 $35 \times 10^4 \text{ km}^2$ 分布在黄土高原^[2]。由于黄土具有疏松多孔的独特结构且内部存在较弱的胶结,因此表现出了独特的工程力学性质,其中最显著的特性就是湿陷性。黄土在天然状态下具有较高强度,但是受水浸湿后其强度会迅速衰减,并发生大幅度体积变形,这个过程具有突然性、不连续性和不可逆性^[3]。因此在工程上合理判断当地黄土湿陷等级,并对黄土进行相应处理以改善其工程性质成为西北地区工程项目最常见的环节之一。

随着中国西部大开发、丝绸之路经济带的提出和发展,国家加大了对西北地区基础设施建设的投资力度,而黄土的湿陷性对工程建设造成了诸多的工程地质问题。而且近年来中国的气候也发生了一些变化,西北地区的降雨量显著增加,黄土遇水强度会迅速衰减的性质引起的工程地质问题也更加突出,对黄土地区各行业的发展造成不同程度的影响,甚至会危及当地居民的生命安全。实际工程中黄土湿陷性引起的问题能否得到有效解决,取决于对黄

土湿陷性成因的研究是否深入。因此,对于黄土湿陷性的研究有着非常重要的实用价值,引起了国内外诸多学者的高度关注。目前对于黄土湿陷性的研究主要集中在黄土微观湿陷机理、宏观湿陷变形量和湿陷性评价等方面。现有研究成果一定程度上使得对黄土湿陷过程及湿陷机理的认识更加明确,但在湿陷机理以及湿陷性评价方面的研究仍存在不足,尤其表现在湿陷发生的根本原因和湿陷理论值和实测值之间的差异上,所以相关理论难以广泛应用于工程实践中指导工程设计。

基于此,本文将综合分析梳理关于黄土湿陷微观机理、湿陷性评价理论以及如何改善湿陷性黄土 3 个方面的现有研究,提出湿陷性研究中存在的问题和发展方向,以便进行下一步研究。

1 黄土湿陷微观机理

国内外学者对黄土湿陷机理已经开展了广泛的研究,提出了一系列假说来解释黄土湿陷发生的原因。例如,从力学机制出发的湿陷机理有毛细管凝聚力假说^[4]、水膜楔入假说^[5]、动水压力说、可溶盐假说^[6-7]、胶体不足说^[8-9]、欠压密说^[10]、结构学说^[11]。但是由于黄土湿陷原因的复杂性和多样性,

所有假说只能解释黄土湿陷中的部分现象,没有一个假说可以完全解释黄土的湿陷原因。所以目前关于黄土的湿陷机理以及一些深层次的现象,比如相同黄土在不同压力下会表现出不同的湿陷规律等,仍然没有统一结论。伴随着扫描电镜(SEM)、压汞试验(MIP)、计算机断层扫描(CT)等微观研究手段的引入和发展,黄土湿陷机理的微观研究得到了长足的发展。尤其是近年来 Image Proplus、ImageJ 等数字图像处理软件的出现,更是使定量分析黄土微观结构的研究向前发展了一大步。本文拟从黄土微观研究常用的3种试验来介绍黄土湿陷微观机理的研究现状。

方祥位等^[12]通过对黄土微观结构定量分析得出黄土上层架空孔隙明显比下部土层多,因此其压缩性和湿陷性也较大,且各深度土层颗粒、孔隙的形态和数量并没有明显的演化规律,但是可以观察到的是颗粒的面积占比、定向度和分布分维逐渐增大,与之相对应,孔隙的面积占比、定向度和分布分维有逐渐减小的趋势。

高国瑞^[13]于1980年首先根据扫描电镜结果给出了中国黄土的显微结构分类,并且提出黄土骨架颗粒的形态、连接方式和排列方式是影响黄土湿陷性的主要因素。随后,高国瑞^[14]根据扫描电镜结果首先提出黄土本身具有的独特微观架空结构体系是黄土湿陷的根本原因,但是关于架空结构体系导致黄土湿陷的机理仍然采用了毛细管凝聚力假说、水凝胶楔入说,关于黄土微观结构在湿陷中的作用沿用了结构学说中黄土颗粒间接接触的作用机理,忽略了微观结构中的孔隙在湿陷过程中的作用。高英等^[15]研究认为,含水率越高,其对黄土结构的破坏作用越强,当含水率增加到一定阈值时,黄土结构中连接较弱的位置会首先发生破坏。雷祥义^[16]将西北、中原地区的黄土孔隙按成因分为原生孔隙和次生孔隙,按孔隙周围颗粒的排列和连接形式又将黄土孔隙分为架空孔隙和镶嵌孔隙,其关于黄土孔隙分类以及定量描述黄土中孔隙的成果为黄土湿陷机理的微观研究奠定了基础。上述研究提出黄土颗粒在湿陷过程中的滑移是颗粒间连接破坏的结果,同时颗粒间接触破坏重组又导致了孔隙的演化,但是缺少对空隙演化的定量分析。王绅皓^[17]按架空孔隙、镶嵌孔隙、胶结物孔隙3种孔隙类型进行分析,如图1所示。根据以往扫描电镜研究结果,黄土骨架颗粒的接触类型可以根据接触形态分为3类,分别是支架接触、镶嵌接触和分布接触。杜汶霖^[3]通

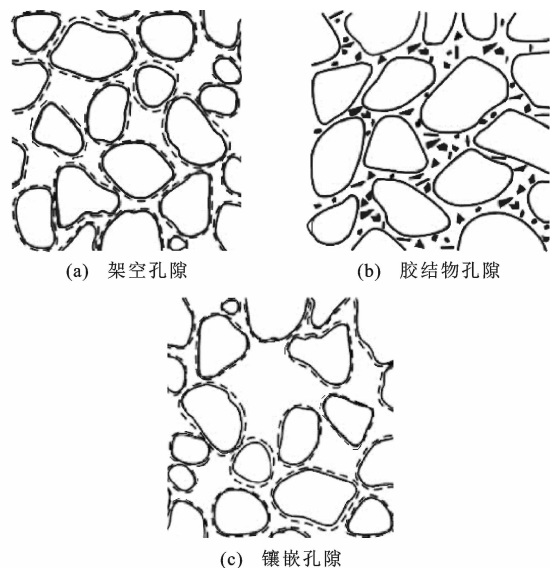


图1 孔隙类型示意图^[17]

Fig. 1 Schematic diagram of pore types^[17]

过SEM发现浸水前后黄土试样的骨架颗粒连接方式并进行对比分析。张晨^[18]通过SEM发现湿陷前黄土颗粒的圆形成度更高,此时的土颗粒被一层黏土物质和碳酸钙等易溶盐包裹,且部分土颗粒会由于胶结物的黏结形成团聚物,但湿陷后团聚物基本消失。杨运来^[19]利用偏光显微镜对黄土颗粒的粒径分布进行了研究,认为粒径小于0.002 mm的颗粒在微观结构中主要起到胶结大粒径颗粒的作用,在黄土遇水之后,胶结强度变低,从而引发湿陷。由于水和荷载的共同作用,黄土颗粒的排布更加紧密,胶结方式和孔隙形态也向更加稳固的方向发展,整体表现为黄土的骨架体积减小,宏观上则表现为湿陷。上述研究证明,可溶盐和其他胶结物在黄土湿陷发生的过程中发挥了一定的作用。笔者对陕西西安、延安以及甘肃兰州等多地黄土开展的双线法湿陷试验结果表明,在胶结物含量差异显著的情况下上述各地黄土均表现出了强烈的湿陷性,可见可溶盐和胶结物含量不是发生湿陷的根本原因。

杨惠^[20]、杜汶霖^[3]、马金龙^[21]利用数字图像处理软件 Image Proplus 对黄土湿陷前后的扫描电镜图像进行了定量研究,研究内容主要包括湿陷前后黄土试样颗粒和孔隙的形态、大小、分布特征以及定向度等。上述研究完善了黄土湿陷微观理论研究中的定量研究,但是关于微观结构发生改变的根本原因缺乏相关探讨。

压汞法不仅能够获得土体孔隙直径的分布情况,而且能测量的孔径范围十分广泛,其精确度也非同类型的其他研究手段所能比。马金龙^[21]、魏亚

妮^[22]都对黄土试样开展了压汞试验,结果表明原状黄土试样的孔隙分布曲线普遍呈双峰状。这是由于黄土在孔隙结构上呈现出颗粒间的较大空隙和聚集体内小微孔隙的二级结构。邵显显^[23]和王绅皓^[17]都对不同干密度湿陷前后的黄土试样进行了压汞试验,获得了试样湿陷前后孔隙分布的变化规律。在湿陷过程中孔隙演化原因研究的基础上进一步完善了孔隙的演化规律。SEM 和 MIP 两种测试方法对试样均有不同程度的破坏,且扫描电镜仅能观察和获得观测截面的面孔隙率,压汞法则无法测量封闭孔隙,二者都不能客观真实地反应颗粒孔隙等微结构的三维空间特征,而 CT 扫描技术规避了上述缺陷,实现了更精准的研究。雷胜友等^[24]利用损伤理论对黄土在三轴剪切试验和浸水试验中的 CT 扫描结果进行了分析,详细介绍了原状黄土在上述试验过程中的演化趋势。蒲毅彬等^[25]通过对 CT 扫描的辅助系统进行完善以及对数字图像处理系统的联网,达到了彩色显示 CT 扫描图像的效果,同时还在一定程度上减小了扫描过程中的数据误差,为数据图像的深入处理提供了基础。魏亚妮等^[26]根据 CT 扫描结果发现颗粒滑移主要是由于部分黏粒发生了水化膨胀。Wei 等^[27]利用 CT 技术,通过定量孔隙网络参数研究了古黄土的微观结构。魏亚妮^[22]通过 Avizo 软件建立了黄土 CT 扫描结果的三维结构量化模型。相比基于二维图像进行的分析,基于黄土三维结构表征的分析不仅能更直观准确地反映黄土中孔隙的尺寸及形貌特征,而且可以获得湿陷过程中颗粒、孔隙及破坏沿各个方向发展的情况。CT 技术的引入使黄土微观结构的研究从二维进入三维,摆脱了传统研究方法过度局限于研究所选取的局部区域,不能真实反映土样全貌的问题,这对于研究黄土湿陷性具有重要意义。

目前关于黄土湿陷微观机理的研究已较为全面,相关研究认为黄土架空结构体系中的连接在水和荷载的共同作用下受到破坏,造成骨架颗粒滑移和大中孔隙体积压缩,进而导致了湿陷的发生。然而关于各种改性方法改善湿陷性的微观研究还相对匮乏,相关研究应该得到更广泛的关注,进而打破工程中湿陷改性领域实践先于理论的局面,为工程实践提供更多的理论支撑。

2 湿陷性评价研究现状

黄土湿陷性评价是湿陷性黄土研究中的一个重要课题,对湿陷性黄土开展正确评价能有效地对黄

土进行分类,也能为后期地基处理提供有效的理论支撑。由于湿陷性黄土在全球广泛分布,而各地黄土的特征各不相同,因此国内外对黄土的评价方法也不尽相同。国外对黄土的湿陷性评价主要侧重于物理参数对湿陷性的影响,通过不同的物理指标对黄土的影响规律建立评价体系。国内在评价湿陷性黄土时,主要依据《湿陷性黄土地区建筑规范》,在评价时可进行室内试验和室外试验对黄土湿陷系数进行测定,进一步确定黄土湿陷量,以此对黄土湿陷性进行评价。近年来,为了对湿陷性黄土进行快速、准确的评价,一大批学者进行了诸多的研究,并提出了许多黄土湿陷性的评价方法。

邵生俊等^[28]、刘小平等^[29]、高凌霄等^[30]采用多元线性回归的方法建立了湿陷系数与各物理指标之间的定量关系式。黄建军等^[31]采用偏最小二乘回归方法建立了黄土湿陷系数的多因素回归模型,结果表明,偏最小二乘法能很好地消除自变量间多重相关性的影响,预测结果优于普通多元线性回归方程。任文博等^[32]选取饱和度、干密度等影响湿陷性的因素,并利用多元线性回归、反向传播神经网络对黄土湿陷性系数进行预测,组合后得到了各种模型,结果表明离散型二项式系数组合模型精度较高。另外也有学者以湿陷影响因素为基本参数,建立湿陷系数预测模型。井彦林^[33]提出了基于数据挖掘技术研究黄土湿陷性的新方法,考虑含水率、干密度、液限、塑限、压缩系数、电阻率、剪切波速及土层埋深等因素对黄土湿陷性进行定量评价;随后又运用最小二乘支持向量机作为挖掘模型,对电阻率、含水率等因素对黄土湿陷性的影响进行分析,采用主成分分析法对数据进行预处理,并运用粒子群优化算法对模型进行反演分析,由此提出了一种评价黄土湿陷性的新方法^[34]。上述研究探索了黄土各项物理指标和湿陷性之间的关系,提出了一系列拟合公式,目的在于通过更加便捷的室内试验对黄土做出较为准确的湿陷性评价,以避免现场试验带来的周期长、人力物力耗费大的缺点。但是目前相关公式计算结果与现场实测值之间仍有明显差异,且相关公式使用条件较为严苛,难以在工程实践中广泛应用。冯小东^[35]基于数据挖掘技术确定了影响黄土湿陷性的 4 个主要因子,并对各因子的影响程度做出评价,通过建立黄土湿陷系数与影响因子间的回归方程,结合 BP 神经网络法建立黄土湿陷系数的预测模型。丁卫锋^[36]通过对物性指标与湿陷系数之间的关系进行分析,建立了黄土湿陷性系数的 BP 神经

网络预测模型,提出了一种适用于所研究工程的湿陷评价方法。韩晓萌^[37]考虑黄土天然含水量、干密度、孔隙比、塑性指数4个因素对黄土湿陷系数的影响,建立了黄土湿陷系数的自适应神经网络模糊推理模型(ANFIS),同时建立多元线性回归方程,对比发现 ANFIS 模型优于多元线性回归模型。已有学者通过 BP 神经网络技术将人工智能引入到黄土湿陷性评价中,建立了黄土湿陷性的预测模型。但是上述预测模型对网络训练中样本数据的需求量和准确性要求十分严格,而目前相关预测模型更多停留在理论层面,训练数据不足,难以保证预测结果的准确性和普适性。

Momeni 等^[38]采用模糊综合评价体系对影响黄土湿陷性的岩土特征、地质和环境因素进行赋值,使用适当的权重为每个因素进行评价,并对所提出的模型进行不确定性建模,创造隶属函数对黄土湿陷性进行评价。黄宇等^[39]基于收集到的60组黄土湿陷性试验资料,选用含水量等影响因素,运用正态信息扩散离散回归方程得到原始信息分布矩阵,并进行正规化处理和模糊近似推理,建立了评价指标与湿陷系数之间的模糊关系和黄土湿陷性评价方法,即

$$\delta'_s = \sum_{i=1}^n (Y_i)^k \delta_{si} \sum_{i=1}^n (Y_i)^k \quad (1)$$

式中: δ'_s 为最终要推论的结果; Y_i 为模糊近似推理等级的可能性分布; δ_{si} 为要推理的等级值; k 为常数,根据实际情况取 $k=2$ 。

王力^[40]探讨了黄土微观结构参数对黄土湿陷变形过程中湿陷系数的影响,基于微结构单元理论建立了快速确定黄土湿陷系数的新途径。Zheng 等^[41]从扫描电镜扫描中提取淤泥、胶体黏土和孔隙结构的微观结构参数,讨论了湿陷性与各微观结构参数之间的相关性,并根据胶体-黏土组分的空间分布进一步对黄土湿陷性进行评价。

安鹏等^[42]基于伊犁黄土的特点和工程需要,进行了基于双线法的原状黄土自重湿陷性离心模型试验,并与现场浸水试验和室内压缩试验进行对比,结果表明离心模型试验的自重湿陷量更接近现场实测值,可以用来进行黄土湿陷性评价。邢义川等^[43]以伊犁湿陷性黄土为研究对象,开展了离心模型试验,提出一种基于离心模型试验的黄土湿陷性评价方法。米文静等^[44]以某黄土场地为研究对象,提出了黄土自重湿陷变形的多地层离心模型试验方法,并与室内湿陷试验和现场浸水试验结果进行对比,结

果表明离心模型试验可有效对自重湿陷性黄土进行评价。

金松丽等^[45]基于“可能湿陷变形”的设计思想建立黄土增湿变形本构模型,提出基于可能湿陷变形的黄土地基湿陷性评价新方法。张爱军等^[46]针对中国现行《湿陷性黄土地区建筑规范》存在不适合渠道工程的缺陷,依托新疆某引水渠道工程,基于“可能增湿变形量”的思路,提出基于增湿变形的渠道工程渠基黄土场地的湿陷性评价方法,即

$$\Delta_p = \beta_0 \sum_{i=1}^n \alpha_i \delta_{si} h_i \quad (2)$$

式中: Δ_p 为可能增湿变形量; α_i 为第 i 层土在实际压力下增湿到某个饱和度时的折算比值; δ_{si} 为第 i 层土在实际压力下的饱和湿陷系数; h_i 为第 i 层土的土层厚度; β_0 为地区修正系数。

王永鑫等^[47]针对室内浸水试验和现场试坑浸水试验测试和评价黄土湿陷性及地基湿陷变形存在的不足,提出了用原位砂井浸水试验进行原位深层黄土的湿陷性分析,并与其他两种方法进行对比,验证了新方法的有效性。Shao 等^[48]基于黄土原位试验方法,提出了一种评价黄土地层湿陷变形的原位砂井渗水饱和黄土试验方法。

综上,学者们不仅在湿陷评价理论方面有一定进展,在湿陷评价试验方法上也做出了许多探索。传统湿陷评价试验有原位试坑浸水试验和室内湿陷试验,试坑浸水试验结果准确但在人力物力上耗费较大,而室内试验主要是双线法湿陷试验,该试验属于单轴压缩侧限变形应力条件浸水试验,所得结果与实际情况存在差异,难以满足工程实际需求。新兴湿陷评价方法最典型的是离心模型试验和原位砂井试验。相较于室内湿陷试验,离心模型试验所得结果更为准确,且更加经济,耗时更短。相较于室内试验,砂井试验的应力情况和地层结构更趋近于原位试验,且对场地要求较低。两种方法都较好地弥补了传统湿陷试验的不足。

已有学者通过研究认识到黄土湿陷量计算值与实测值之间的差异,并对现有的黄土湿陷量评价公式进行了修正。杨校辉等^[49]针对大厚度自重湿陷性黄土湿陷性评价时自重湿陷量计算值与实测值之间的差异,提出计算不同地区、不同微结构类型土时应采用不同的湿陷系数,可使黄土湿陷性评价更加合理。马闫等^[50]开展了自重湿陷性黄土现场试坑浸水试验,建立了以面积为权重的修正系数 β_0 的计算方法。针对黄土自重湿陷量计算值与实测值之间

的差异,郑建国等^[51]提出引入湿陷土不连续分布效应系数 k ,崔自治等^[52]将因地区土质而异的修正系数 β_0 修正为根据地区现场浸水试验资料确定的经验修正系数 β_z ,姚志华等^[53]引入一个深度系数 ξ 的方法对室内黄土湿陷性评价公式进行修正,使黄土湿陷性评价更加合理,具体修正公式见表1。

表1 不同修正方法及修正公式

Table 1 Different correction methods and correction formulas

资料来源	修正方法	公式
文献[51]	不连续分布效应系数 K	$\Delta_{zs} = k\beta_0 \sum_{i=1}^n \delta_{zsi} h_i$
文献[52]	土质经验修正系数	$\Delta_{zs} = \beta_z \sum_{i=1}^n \delta_{zsi} h_i$
文献[53]	深度修正系数	$\Delta_{zs} = \beta_0 \sum_{i=1}^n \xi \delta_{zsi} h_i$

注: Δ_{zs} 为自重湿陷量; δ_{zsi} 为第 i 层土的自重湿陷系数。

王铁行等^[54-55]总结了卸荷作用对黄土湿陷性的影响规律,提出了卸荷作用影响下黄土湿陷系数的确定方法,并建立了卸荷作用下黄土湿陷性的评价方法,即

$$\delta_{us} = \delta_s [1 - (1 - \eta_l)(1 - 1.067K^{1.695})] \quad (3)$$

式中: δ_{us} 为考虑卸荷湿陷系数; δ_s 为不考虑卸荷湿陷系数; η_l 为反映卸荷作用发生时黄土已完成湿陷程度的系数; K 为反映黄土湿陷过程中卸荷作用发生时竖向压力减小幅度的参数。

邵生俊等^[56]、王丽琴^[57]考虑结构性对黄土湿陷性的影响,将构度指标引入到黄土湿陷性评价及湿陷变形计算,建立了考虑结构性的黄土湿陷性评价方法,即

$$\delta_s = \frac{e_p - e'_p}{1 + e_0} \quad (4)$$

式中: δ_s 为湿陷系数; e_p 为保持天然湿度和结构的试样加载至一定压力下稳定后的孔隙比; e'_p 为加压稳定后的试样在浸水(饱和)作用下附加下沉稳定后的孔隙比; e_0 为试样的初始孔隙比。

针对当前采用的黄土湿陷性评价方法中的不足,部分学者提出了一些新的评价方法,这些方法极大地丰富了黄土湿陷性评价体系。Dusan等^[58]使用地震膨胀仪为黄土湿陷的评价提出了新方法。提出了材料指标与水平应力指标2个新参数,当材料指标与水平应力指标的比值大于5时,黄土会发生湿陷。Wang等^[59]探讨了反复湿陷下的综合物理指标与黄土湿陷性的关系,并利用黄土结构屈服强度对反复湿陷过程中的压缩曲线进行归一化,提出了

一种黄土反复湿陷性评价方法。孙新生^[60]基于原位测试方法-静力触探试验对当地湿陷性黄土进行评价,并判断湿陷性黄土分布深度,对工程实践提供了参考和建议。黄雪峰等^[61]通过三轴应力条件下黄土的湿陷试验测定黄土的自重湿陷系数,并得出三轴自重湿陷系数曲线拟合公式,可以作为自重湿陷性评价的参考依据。武小鹏^[62]首次提出了现场试验中湿陷性黄土下限深度的确定方法以及对室内试验结果的修正方法,可为大厚度湿陷性黄土区的评价提供参考。Nie等^[63]测试了压实黄土在200 kPa压力下含水量、干密度和湿陷系数等不同条件下的电阻率,确定了湿陷性与电学参数的相关性,并基于电阻率提出了一种评价压实黄土湿陷性的新方法。王厚宇^[64]对不同密度与电阻率时黄土样的湿陷系数开展研究,通过拟合、推导得到了黄土湿陷系数与密度、电阻率的定量关系式,实现基于电学指标的黄土湿陷系数的现场评价。穆青翼等^[65]、Bhuyan等^[66]、Curioni等^[67]基于时域反射技术(TDR)对湿陷性黄土介电常数和电导率进行原位测量,并采用经验模型对湿陷性黄土进行评价,计算公式为

$$K_{CP} = k_1 e + k_2 (w/w_1) + k_3 \ln(P) + k_4 \quad (5)$$

式中: K_{CP} 为湿陷系数; e 为孔隙比; P 为湿陷压力; w 为质量含水率; w_1 为土体液限; k_1 、 k_2 、 k_3 、 k_4 均为参数。

王立新等^[68]提出中国现行《湿陷性黄土地区建筑规范》(GB 50025—2018)不适用于开挖卸荷和具有一定埋深的地下建筑,并采用数值分析方法建立了适用于基底黄土评价的浸水结构破坏湿陷性方法。倪万魁等^[69]提出中国现行《公路路基设计规范》(JTG D30—2015)在评价公路路基黄土湿陷性方面存在不合理之处,并结合降雨入渗规律提出了一种适用于高速公路路基黄土湿陷性变形的评价方法与预测模型。

在浸水自重湿陷情况下,湿陷变形总量 S_1 的表达式为

$$S_1 = \sum_{i=1}^n \frac{(\Delta P_{1i} + \Delta P_{1(i-1)})/2}{E'_{Si}} \Delta Z_i \quad (6)$$

上部加载情况下,湿陷变形总量 S_2 的表达式为

$$S_2 = \sum_{i=1}^n \frac{(\Delta P_{2i} + \Delta P_{2(i-1)})/2}{E'_{Si}} \Delta Z_i \quad (7)$$

式中: ΔP_{1i} 、 $\Delta P_{1(i-1)}$ 分别为第 i 层和第 $i-1$ 层土浸水自重湿陷情况下最终作用在土体上的应力差; ΔP_{2i} 、 $\Delta P_{2(i-1)}$ 分别为第 i 层、第 $i-1$ 层土上部加载情况下作用在土体上的应力差; E'_{Si} 为饱和土体的压

缩量; Δz_i 为第 i 层土的土体厚度。

李征征^[70]基于非饱和土力学理论与分层总和法原理,通过室内自重湿陷性试验,研究了重塑黄土在不同初始含水率下的自重湿陷系数,建立了新的湿陷性评价方法。总湿陷量 S 的表达式为

$$S = \sum_{i=1}^n \frac{\gamma_{\text{sat}} z_i + (\gamma_{\text{sat}} - \gamma) \Delta z_i + \Psi}{E_s} \Delta z_i \quad (8)$$

式中: γ_{sat} 为土体饱和重度,取值为 $18.5 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-3}$; z_i 为上覆饱和土体厚度; γ 为土的天然重度,取值为 $14.4 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-3}$; E_s 为土体压缩模量; Ψ 为下部非饱和土体的基质吸力。

关于湿陷性理论计算值和实测值之间的差异,很多学者在对现有评价方法进行修正方面做出了诸多尝试,包括提出不同的修正系数,或者对不同地质条件和工程条件有针对性地提出较为准确的评价方法,但这些评价方法都具有较大的局限性,且适用条件复杂,难以广泛应用。

方瑾瑾等^[71]对评价黄土的常规三轴仪装置进行改进,并以改善后的真三轴仪装置对原状黄土进行分级增湿试验,进而对湿陷性黄土的增湿变形特性进行分析。Wang 等^[72]通过对 6 组不同场地黄土受限压缩试验的压缩曲线进行归一化,并用复合幂指数模型进行描述,结合了黄土压缩特性与初始结构性质的关系提出了一种黄土湿陷性分析评价新方法。Zhang 等^[73]基于随机场理论和 Cholesky 分解方法,采用蒙特卡罗模拟法分析西安典型湿陷性黄土自重沉降的随机性和压缩模量空间变异性的影响。提出压缩模量等效特征值,用于评价西安典型黄土地层的湿陷性。Wen 等^[74]基于渗透速度进行湿陷性黄土渗透试验研究,探讨了原状湿陷性黄土在不同固结压力下的渗透特性;对湿陷性黄土地区实际工程的评价具有指导意义。

综上,近年来对黄土湿陷性评价的研究产生了很多成果,相关的新方法、新理论仍在不断涌现,前人的研究成果极大地推动了黄土湿陷性研究的发展,但目前对黄土湿陷性的研究还存在着许多难以解决的问题,例如黄土湿陷量计算值与实测值之间的差异,对非饱和湿陷性黄土的研究不足等。同时可以看到人工智能和机器学习在黄土湿陷评价领域的巨大潜力,值得学者关注和深入研究。尤其应该在建立预测模型后通过持续加大神经网络训练的样本量,不断提升模型预测结果的准确率和适用场景的广泛性。而且随着中国西部经济建设的进一步加速发展,势必会对黄土湿陷性研究提出许多新挑战,

这就需要学者在前人成果基础上开展更深入的研究,提出更有效、更快捷的黄土湿陷性评价方法。

3 湿陷性黄土的改性方法

湿陷性黄土的改性方法繁多,目前使用较为广泛的黄土改性方法主要包括物理改性加固和化学改性加固。物理改性主要是对黄土本身的结构和性能进行改性,使黄土的孔隙结构及土颗粒排列方式发生改变,而不改变其化学成分的一种固化方式,主要包括强夯法、预浸水法、孔内深层强夯法、孔内深层超强夯法(SDDC 法)、振动挤密法、振冲挤密法及桩基挤密法等。化学改性主要是向黄土中添加水泥、石灰、粉煤灰、矿渣及水玻璃等固化剂,通过固化剂与土体中的水和可溶性盐类发生复杂的物理化学反应从而达到加固的目的,固化剂主要可分为无机类、有机类、离子类及生物酶类等。

3.1 物理方法

杨天亮等^[75]通过理论分析与强夯试验相结合,得出在黄土地区采用高能级强夯法处理湿陷性黄土时应选用大于 $6000 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 的夯能,对改善黄土的湿陷性、提高黄土强度有较好的效果。李辉山等^[76]采用预浸水法对兰州自重湿陷性黄土地基进行加固处理,结果表明预浸水法可以消除 10 m 厚度范围内的黄土湿陷,同时会伴随有土体短期承载力降低,需要结合垫层法等其他方法进行联合加固处理。冯志焱等^[77]通过静荷载试验、湿陷试验等发现孔内深层强夯法(DDC 法)可消除黄土湿陷性,提高土体承载力。付红梅^[78]向黄土中添加中砂,通过大量的室内压缩试验发现,中砂的掺入可使黄土的湿陷系数、溶滤变形系数等指标有所减小,湿陷起始压力有所增大,改良土的湿陷程度降低。何玉琪等^[79]将土工格栅作为加筋材料,通过试验研究了水平加筋和倾斜加筋对黄土强度特性的影响,结果表明水平加筋可使黄土强度提升,而倾斜加筋使黄土强度下降。杜汶霖^[3]通过室内试验同时利用扫描电镜技术发现,向黄土中掺入膨润土可使湿陷性黄土的工程性质得到改善,黄土的湿陷性减弱甚至消除。随着工程实践的发展,在 DDC 法基础上发展出了 SDDC 法,相较之下 SDDC 法具有夯击能更高、影响深度和范围更大的优点。杨新文等^[80]通过桩基静载试验发现挤密桩预处理后的地基承载性能平均提高 1.41 倍,且基础沉降随着挤密系数的提高而减小。周小松等^[81]通过三轴固结不排水试验和单桩载荷试验发现 SDDC 挤密桩可以有效消除桩长深度范

围内土体的湿陷性,且使得桩间土的承载力得到了明显提升。朱彦鹏等^[82]通过自重湿陷性黄土地基的现场试验测定了挤密系数,并通过开展沉降监测以及室内土工试验发现,灰土挤密桩相较于素土挤密桩具有更好的抗渗性能。

振动挤密法和振冲挤密法主要通过机械振动和高压水流成孔并添加桩体填料,实现对周围土体的挤密,进而改善黄土地基,但相关研究尚相对匮乏。

3.2 化学方法

3.2.1 无机类固化剂

杨忠诚等^[83]通过一系列试验,研究了不同水泥掺量和养护龄期下湿陷性黄土的压缩系数、压缩模量和强度的变化。王任杰^[84]以兰州地区黄土为研究对象,通过室内试验研究发现水泥对黄土的收缩性、无侧限抗压强度、抗剪强度、渗透性及水稳性改良效果显著。Liu 等^[85]通过扫描电镜试验发现,当掺入一定含量的水泥时,黄土中的黏粒含量增加,黏聚力和内摩擦角增大,颗粒之间的接触由点接触变为面接触,黄土结构的稳定性得到显著改善。周建基等^[86]分析了不同掺灰比下黄土压缩性、渗透性及湿陷性的变化情况,发现石灰对黄土湿陷性的改良效果显著,同时通过试验得出了石灰改良黄土的最佳配合比为 7%。谢潇等^[87]研究了生石灰改良黄土的强度特性及微观机制。结果表明,黄土经生石灰改良后其强度明显提高,骨架颗粒之间及其表面附着的胶结物质增多,整体性增强。赵少强等^[88]通过室内试验结合理论分析发现,粉煤灰改良黄土的压缩系数和压缩模量受掺灰比和龄期影响较大,粉煤灰对黄土的水稳性改善效果不明显。郑乐^[89]利用室内渗透试验和环境扫描电镜(ESEM)发现,经粉煤灰改良后的土体中大孔占比相较于素土有所减少,但相比于石灰改良黄土依然较大,改良土密实度和渗透性有所改善,但因大孔隙的存在使其改良效果不佳。郭婷婷等^[90]利用石灰和粉煤灰的混合物进行大量试验,研究了二灰土的各种力学性质,结果表明,向黄土中掺入石灰和粉煤灰可以降低土体压缩性,减小土体孔隙比,改善黄土的湿陷性。刘鹏^[91]通过试验分析了改良土的基本物理性质,得到了强度随二灰土中石灰和粉煤灰配合比的变化规律。崔素丽等^[92]通过压缩试验、湿陷试验及无侧限抗压强度试验发现,水泥窑灰能够显著降低土体压缩性、孔隙比及湿陷性,同时显著提高土体的无侧限抗压强度。司冬冬^[93]通过一系列试验得出水泥窑灰可以降低黄土的可塑性,改善土体的水稳性,改

变土体孔隙类型和土颗粒连接方式,使土体结构变得密实。田高源^[94]通过一系列室内试验分析了不同浓度硫酸及赤泥掺量对改良黄土抗剪强度及抗渗性能的影响,并得出赤泥掺量在 15%附近时抗剪强度最大且渗透系数较小,发现赤泥改良黄土抗渗效果较好。黄凌昱^[95]研究了不同磷酸氢二铵(DAP)掺量下改性土的单轴抗压强度变化规律和微观加固机理。发现 DAP 对提升黄土抗压强度效果显著,掺入 DAP 溶液浓度越高,加固效果越明显。金明亮等^[96]通过无侧限抗压强度试验和浸水强度损失试验研究了钢渣掺入量对改良土强度的影响,同时通过 CBR 承载比试验得出钢渣改良黄土的 CBR 承载比小于水泥改良土而与石灰改良黄土相当。贾宏铮^[97]通过直剪试验和固结试验得出硅化注浆对黄土抗剪强度改良效果较好,但是由于硅化法加固黄土的过程中有水的加入,会导致黄土地基产生较大的附加沉降,因而在运用过程中需要特别注意。

不同的无机类固化剂可以改善黄土的不同物理性质,尤其在水稳性和抗剪强度上。同时应该看到固化剂的掺量和相关性质改善程度之间并非简单的正相关,甚至在某些固化剂掺量过大时会导致相关性质的退化,例如石灰和粉煤灰掺量过大时就会削弱黄土团粒之间的胶结,反而导致抗剪强度降低。

3.2.2 有机类固化剂

蔡东艳等^[98]通过无侧限抗压强度试验、浸水试验等室内试验研究发现,黄土经水玻璃加固后强度显著提高,为天然黄土无侧限抗压强度的 20 倍以上,土样不再具有水解性和湿化性。刘钊钊等^[99-100]研究发现木质素对改良黄土的基本物理性质影响较大,改良后黄土的黏聚力和抗剪强度增大,水稳性也显著改善,土体的结构类型和颗粒间的接触方式也发生了改变。马金龙^[21]通过一系列试验发现木钙素对黄土改良效果显著,改良后的黄土在强度、渗透性等方面有较大的改善,抗崩解性能大幅提高,黄土结构的稳定性和密实度得到增强。韩领相^[101]以 CONSOLID 固化剂为改性材料进行试验,研究发现改良后黄土的渗透性和水稳性有较大改善,改性黄土的抗崩解性、斥水性及抗渗性增加,土体的细观结构发生明显变化。张耀等^[102]利用乙酸溶液能够溶解碳酸钙的特性,通过试验发现乙酸溶液对黄土的结构形式改良效果显著,改良后土样发生湿陷或震陷的可能性和危害性都有所降低。Haeri 等^[103]通过试验研究了纳米二氧化硅(NS)、纳米碳酸钙(NCC)和纳米黏土(NC)对湿陷性黄土性能的影响,

结果表明 3 种纳米材料均会在增加黄土抗压强度的同时改善黄土的湿陷性能。唐辉雄等^[104]通过试验发现高分子固化剂对黄土的无侧限抗压强度、抗冲刷和水稳定性改良效果显著,对提高黄土工程性质效果较好。

不同的固化剂有着不同的使用场景,如乙酸溶液在压力较低时可以显著改善黄土的不良结构,但在荷载较大时,黄土的孔隙结构已经发生了破坏,乙酸溶液的改善作用效果并不明显。同时不同固化剂对黄土的不同性能改善程度也不相同,在工程实践中应该根据工程实际要求,针对性地选取固化剂类型,并根据相关固化剂的特性设计最佳掺量。

3.2.3 离子类固化剂和生物酶类固化剂

离子类固化剂的作用机理主要是通过阳离子交换、破坏双电层结构和磺化油的疏水作用,实现黄土水稳性和击实特性的改善。李建东等^[105]探究了 F1 离子固化剂对改良黄土力学特性和微观结构的影响,试验表明 F1 对黄土改良效果显著,改良后黄土的粒间连接方式发生改变,粒间连接强度、土体密实度和承载力得到改善。张丽萍等^[106]研究了 EN-1

固化剂对黄土强度和渗透性的影响,结果表明其改善效果受固化剂掺量、养护龄期、压实度和含水率的影响较大,建议工程实践中 EN-1 固化剂的适宜掺量为 0.01%。

生物酶类固化剂主要是通过促进钙离子和碳酸根等离子的生成进而诱导生成胶结物沉淀,填充改善黄土中的不良孔隙结构,从而实现黄土的改性。孔德成等^[107]利用微生物诱导碳酸钙沉淀(MICP)技术对湿陷性黄土进行改良,发现 MICP 对黄土的工程性质、无侧限抗压强度改良效果显著,黄土的力学特性及湿陷性得到改善。同时 MICP 还具有低污染、低成本、低功耗等优势。

上述改性方法对黄土性能指标的影响汇总如表 2 所示。

4 结 语

(1)对黄土湿陷微观机理的研究最终目的是解释湿陷问题进而预测不同条件下的宏观行为。近年来逐渐发展的高精度 3D 扫描表征是通过精细化研究方式理解湿陷机理的重要途径,后续应多着重此

表 2 不同改性方法对黄土性能的影响

Table 2 Effect of different modification methods on loess properties

加固方法	掺量	改性结果	数据来源
水泥	7%	抗压强度提高 10 272.1%	文献[82]
		抗剪强度提高(φ 增大 25.2%, c 增大 179.3%)	
		压缩系数减小 96.0%	
石灰	8%	抗剪强度 φ 增大 60.6%, c 增大 455.6%	文献[86]
粉煤灰	15%	抗压强度提高 1 405.1%	文献[87]
		抗剪强度提高(φ 增大 197.6%, c 增大 1 004.1%)	
		压缩系数减小 92.3%	
二灰土	石灰、粉煤灰、土的配合比 1:2:7	抗剪强度提高($\varphi=34.60^\circ$, $c=92.16\text{ kPa}$)	文献[89]
		压缩系数为 0.018 MPa^{-1}	
		压缩模量为 96.66 MPa	
		渗透系数为 5.16×10^{-7}	
水泥窑灰	27%	抗压强度提高 113.1%	文献[91]
		压缩系数减小 27.0%	
高分子稳固剂	2%	湿陷系数减小 70.8%	文献[103]
		抗压强度提高 78.1%	
		抗压强度提高 43.8%	
F1 离子固化剂	$0.3\text{ L}\cdot\text{m}^{-3}$	抗剪强度提高(φ 增大 18.9%, c 增大 41.6%)	文献[104]
		湿陷系数减小 70.3%	
EN-1 固化剂	0.01%	抗剪强度提高(φ 增大 5.9%, c 增大 39.7%)	文献[105]
		渗透系数减小 62.3%	
MICP	$1.25\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$	抗压强度提高 150%	文献[106]
		湿陷系数减小 75.2%	

注: φ 为内摩擦角; c 为黏结系数。

类研究。

(2)目前对黄土微观结构的研究已取得一定成果,但发展还是相对缓慢,其难点在于建立微观和宏观相结合的本构关系,尤其是黄土湿陷机理复杂,很难进行定量分析。后续应采用多种手段对湿陷性黄土的矿物成分、微观结构、孔隙特征等进行综合评价,建立微观结构特征与宏观湿陷变形量之间的关系。

(3)不同地区黄土差异性较大,后续应针对不同地区、不同地层黄土试样开展大量试验,通过数理分析或人工智能等方法,形成一个完整的预测模型和数据库,以明确单个因素对宏观湿陷行为的影响权重,建立量化的湿陷计算模型,以此指导不同工况的实际工程。

(4)对于黄土湿陷性评价,目前大多是针对原状黄土。实际工程中对于湿陷性地基会采用垫层法、挤密法、强夯法等处理措施,而对于处理后的黄土地基湿陷性的评价研究较少,应该对此类研究给予更多关注,将室内缩尺试验和原位试验相结合,为工程中常用的改性方法提供合理的评价理论,有效避免工程实践中改性措施和改性程度与工程实际情况不匹配所造成的危害和浪费。

参考文献:

References:

[1] LI Y R,SHI W H,AYDIN A,et al. Loess genesis and worldwide distribution [J]. Earth-Science Reviews, 2020,201:102947.

[2] WANG W,SUN L,WANG Y H,et al. A convex distribution of vegetation along a stony soil slope due to subsurface flow in the semiarid Loess Plateau,north-west China [J]. Journal of Hydrology, 2020, 586: 124861.

[3] 杜汶霖. 湿陷性黄土改性前后宏观变形特征及微观结构演化机制研究[D]. 绵阳:西南科技大学,2021.

DU Wenlin. Study on macroscopic deformation characteristics and microstructure evolution mechanism of collapsible loess before and after modification[D]. Mianyang:Southwest University of Science and Technology,2021.

[4] BARDEN L,MADEDOR A O,SIDES G R. The flow of air and water in partly saturated clay soil[J]. Developments in Soil Science,1972,2:299-311.

[5] 捷尼索夫 Н Я. 黄土与黄土状亚粘土的建筑性质 [M]. 王国城,译. 北京:地质出版社,1956.

ДЕНИСОВ Н Я. Architectural properties of loess

and loess-like loam [M]. Translated by WANG Guocheng. Beijing: Geological Publishing House, 1956.

[6] 关文章. 黄土含水量的变化与地基评价预测[J]. 水文地质工程地质,1981,8(4):46-48.

GUAN Wenzhang. Change of water content in loess and foundation evaluation and prediction[J]. Hydrogeology and Engineering Geology,1981,8(4):46-48.

[7] 关文章. 土湿陷原因之初步研究[C]//中国地质学会工程地质专业委员会. 全国首届工程地质学术会议论文选集. 北京:科学出版社,1979:73-78.

GUAN Wenzhang. A preliminary study on the causes of soil collapsibility[C]//The Engineering Geology Committee of China Geological Society. Selected Papers of the First National Engineering Geology Academic Conference. Beijing:Science Press,1979:73-78.

[8] 朱海之. 黄河中游马兰黄土颗粒及结构的若干特征:油浸光片法观察的结果[J]. 地质科学,1963(2):88-100,102.

ZHU Haizhi. Some characteristics of grain and structure of Malan loess in the middle reaches of the Yellow River — observation results by oil-immersed light slice method[J]. Chinese Journal of Geology (Scientia Geologica Sinica),1963(2):88-100,102.

[9] 高国瑞. 兰州黄土显微结构和湿陷机理的探讨[J]. 兰州大学学报,1979,15(2):123-134.

GAO Guorui. Study of the microstructures and the collapse mechanism in loess soil from Lanzhou[J]. Journal of Lanzhou University,1979,15(2):123-134.

[10] 张宗祜. 中国黄土类土湿陷性及渗透性基本特征[J]. 中国地质,1962(12):1-8.

ZHANG Zonghu. Basic characteristics of collapsibility and permeability of loess-like soil in China[J]. Geology in China,1962(12):1-8.

[11] KARL T. Theoretical soil mechanics[M]. New York: Wiley and Sons,1943.

[12] 方祥位,欧益希,李春海,等. 浸湿对原状 Q₂ 黄土微观结构与力学性质的影响研究[J]. 岩土力学,2015, 36(增 2):111-117.

FANG Xiangwei, OU Yixi, LI Chunhai, et al. Research on influence of soaking on microstructure and mechanical behavior of Q₂ loess[J]. Rock and Soil Mechanics,2015,36(S2):111-117.

[13] 高国瑞. 黄土显微结构分类与湿陷性[J]. 中国科学, 1980,10(12):1203-1208,1237.

GAO Guorui. Classification of microstructure and collapsibility of loess[J]. Science in China,1980,10(12): 1203-1208,1237.

- [14] 高国瑞. 黄土湿陷变形的结构理论[J]. 岩土工程学报, 1990, 12(4): 1-10.
GAO Guorui. A structure theory for collapsing deformation of loess soils [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1990, 12(4): 1-10.
- [15] 高 英, 马艳霞, 张吾渝, 等. 西宁地区黄土增湿变形特性及微观结构分析[J]. 工程地质学报, 2019, 27(4): 803-810.
GAO Ying, MA Yanxia, ZHANG Wuyu, et al. Analysis of humidifying deformation characteristics and microstructure of loess in Xining area[J]. Journal of Engineering Geology, 2019, 27(4): 803-810.
- [16] 雷祥义. 中国黄土的孔隙类型与湿陷性[J]. 中国科学(B辑), 1987, 17(12): 1309-1318.
LEI Xiangyi. Pore types and collapsibility of loess in China[J]. Science in China, SerB, 1987, 17(12): 1309-1318.
- [17] 王绅皓. 延安新区黄土浸水作用下的压缩变形特征及微观结构研究[D]. 西安: 西北大学, 2021.
WANG Shenhao. Study on compressive deformation characteristics and microstructure of loess under water immersion in Yan'an new area[D]. Xi'an: Northwest University, 2021.
- [18] 张 晨. 马兰黄土湿陷变形特征及其微观机理试验研究[D]. 西安: 长安大学, 2020.
ZHANG Chen. The experimental study on deformation characteristics and microscopic mechanism of Malan loess collapsibility[D]. Xi'an: Chang'an University, 2020.
- [19] 杨运来. 黄土湿陷机理的研究[J]. 中国科学(B辑), 1988, 18(7): 756-766.
YANG Yunlai. Study on collapsibility mechanism of loess[J]. Science in China, SerB, 1988, 18(7): 756-766.
- [20] 杨 惠. 基于微观尺度的黄土湿陷特性及模型研究[D]. 西安: 西北大学, 2020.
YANG Hui. Study on loess collapsible characteristics and model based on microscale[D]. Xi'an: Northwest University, 2020.
- [21] 马金龙. 木钙改良黄土的工程性质及微观结构研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2022.
MA Jinlong. Study on the engineering properties and microstructure of calcium lignosulfonate stabilized loess[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2022.
- [22] 魏亚妮. 水作用下黄土三维微结构演化及湿陷机理研究[D]. 西安: 长安大学, 2019.
WEI Yani. Research on three-dimensional microstructure evolution during wetting and collapsible mechanism of loess[D]. Xi'an: Chang'an University, 2019.
- [23] 邵显显. 黄土湿陷过程中微观结构的动态变化研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2014.
SHAO Xianxian. Microstructure change of loess soil during wet collapsing[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2014.
- [24] 雷胜友, 唐文栋. 黄土在受力和湿陷过程中微结构变化的CT扫描分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(24): 4166-4169.
LEI Shengyou, TANG Wendong. Analysis of microstructure change for loess in the process of loading and collapse with CT scanning[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(24): 4166-4169.
- [25] 蒲毅彬, 陈万业, 廖全荣. 陇东黄土湿陷过程的CT结构变化研究[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(1): 49-54.
PU Yibin, CHEN Wanye, LIAO Quanrong. Research on CT structure changing for damping process of loess in Longdong[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(1): 49-54.
- [26] 魏亚妮, 范 文, 麻广林. 黄土高原马兰黄土微结构特征及湿陷机理[J]. 地球科学与环境学报, 2022, 44(4): 581-592.
WEI Yani, FAN Wen, MA Guanglin. Characteristics of microstructure and collapsible mechanism of Malan loess in loess plateau, China[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2022, 44(4): 581-592.
- [27] WEI T T, FAN W, YUAN W N, et al. Three-dimensional pore network characterization of loess and paleosol stratigraphy from South Jingyang Plateau, China [J]. Environmental Earth Sciences, 2019, 78(11): 333.
- [28] 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(S2): 27-34.
- [29] 刘小平, 李 宁, 王玉涛, 等. 汾渭盆地西北缘巨厚黄土湿陷特性现场试验研究[J]. 西安理工大学学报, 2020, 36(1): 107-114, 121.
LIU Xiaoping, LI Ning, WANG Yutao, et al. Study on the characteristics of super-thick loess collapsibility in the northwestern margin of the Fenwei Basin [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2020, 36(1): 107-114, 121.
- [30] 高凌霄, 赵天雁. 黄土湿陷系数与物性指标间的定量

- 关系[J]. 大连民族学院学报, 2004, 6(5): 63-65.
- GAO Lingxia, ZHAO Tianyan. The quantitative relation between loess collapsibility and its physical index [J]. Journal of Dalian Nationalities University, 2004, 6(5): 63-65.
- [31] 黄建军, 李雪梅, 滕宏泉. 基于偏最小二乘法的黄土湿陷性评价模型[J]. 灾害学, 2021, 36(2): 60-64.
- HUANG Jianjun, LI Xuemei, TENG Hongquan. Evaluation model of loess collapsibility based on the partial least squares method[J]. Journal of Catastrophology, 2021, 36(2): 60-64.
- [32] 任文博, 刘云龙, 李佳佳, 等. 基于离散型二项式系数组合模型的黄土湿陷性评估[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(12): 4945-4953.
- REN Wenbo, LIU Yunlong, LI Jiajia, et al. Evaluation of loess collapsibility based on discrete binomial coefficient combination model[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(12): 4945-4953.
- [33] 井彦林. 基于数据挖掘技术的黄土湿陷性研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2006.
- JING Yanlin. Study on loess collapsibility based on data mining[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2006.
- [34] 井彦林, 仵彦卿, 林杜军, 等. 基于最小二乘支持向量机的黄土湿陷性预测挖掘[J]. 岩土力学, 2010, 31(6): 1865-1870.
- JING Yanlin, WU Yanqing, LIN Dujun, et al. Prediction of loess collapsibility by using data mining based on least squares support vector machines[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(6): 1865-1870.
- [35] 冯小东. 某仿真大坝地基黄土湿陷性评价[D]. 兰州: 兰州大学, 2012.
- FENG Xiaodong. Evaluation of loess collapsibility for the foundation of a simulation dam [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2012.
- [36] 丁卫锋. 引汉济渭二期工程沿线黄土湿陷性评价研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2020.
- DING Weifeng. Study on the collapsible zoning of loess along the second phase of the Han-Ji-Wei River diversion project[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2020.
- [37] 韩晓萌. 郑西高速铁路路基黄土湿陷性分析[D]. 西安: 西北大学, 2009.
- HAN Xiaomeng. Analysis on loess collapsibility of Zhengxi high-speed railway [D]. Xi'an: Northwest University, 2009.
- [38] MOMENI M, SHAFIEE A, HEIDARI M, et al. Evaluation of soil collapse potential in regional scale[J]. Natural Hazards, 2012, 64(1): 459-479.
- [39] 黄宇, 王延寿, 吴光辉. 基于模糊信息优化方法的黄土湿陷性评价[J]. 甘肃科学学报, 2018, 30(4): 94-99.
- HUANG Yu, WANG Yanshou, WU Guanghui. Evaluate loess collapsibility based on fuzzy information optimization method[J]. Journal of Gansu Sciences, 2018, 30(4): 94-99.
- [40] 王力. 基于微结构单元理论的黄土湿陷性预测模型研究[D]. 西安: 长安大学, 2021.
- WANG Li. Research on prediction model of loess collapsibility based on microstructure unit theory [D]. Xi'an: Chang'an University, 2021.
- [41] ZHENG Z Y, LI X, WANG L, et al. A new approach to evaluation of loess collapsibility based on quantitative analyses of colloid-clay coating with statistical methods[J]. Engineering Geology, 2021, 288: 106167.
- [42] 安鹏, 邢义川, 张爱军, 等. 基于离心模型试验的深厚湿陷性黄土自重湿陷性评价研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2016, 48(6): 23-30.
- AN Peng, XING Yichuan, ZHANG Aijun, et al. Research on evaluation of self-weight collapsibility for large-thickness collapsible loess using centrifugal model test[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2016, 48(6): 23-30.
- [43] 邢义川, 金松丽, 赵卫全, 等. 基于离心模型试验的黄土湿陷试验新方法研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(3): 389-398.
- XING Yichuan, JIN Songli, ZHAO WeiQuan, et al. New experimental method for loess collapsibility using centrifugal model tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(3): 389-398.
- [44] 米文静, 张爱军, 刘争宏, 等. 黄土自重湿陷变形的多层离心模型试验方法[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(4): 678-687.
- MI Wenjing, ZHANG Aijun, LIU Zhenghong, et al. Multi-stratigraphic centrifugal model test method for determination of self-weight collapsible deformation of loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(4): 678-687.
- [45] 金松丽, 邢义川, 赵卫全, 等. 基于单线法试验的黄土增湿变形非线性模型研究[J]. 水利学报, 2017, 48(6): 710-719.
- JIN Songli, XING Yichuan, ZHAO WeiQuan, et al. Study on nonlinear constitutive model for loess moistening deformation based on single-line experiment method[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48(6): 710-719.

- [46] 张爱军,邢义川,汪海涛,等. 基于增湿变形的渠道工程黄土渠基湿陷性评价方法[J]. 水利学报, 2017, 48(1):41-51,60.
ZHANG Aijun, XING Yichuan, WANG Haitao, et al. Evaluation method for collapsibility of channel engineering with loess foundation based on moistening deformation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48(1):41-51,60.
- [47] 王永鑫,邵生俊,韩常领,等. 湿陷性黄土砂井浸水试验的应用研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(增1): 159-164,7.
WANG Yongxin, SHAO Shengjun, HAN Changling, et al. Application of sand drain immersion tests on collapsible loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(S1):159-164,7.
- [48] SHAO S, SHAO S J, LI J, et al. Collapsible deformation evaluation of loess under tunnels tested by in situ sand well immersion experiments[J]. Engineering Geology, 2021, 292:106257.
- [49] 杨校辉,黄雪峰,朱彦鹏,等. 大厚度自重湿陷性黄土地基处理深度和湿陷性评价试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(5):1063-1074.
YANG Xiaohui, HUANG Xuefeng, ZHU Yanpeng, et al. Experimental study on collapsibility evaluation and treatment depths of collapsible loess upon self weight with thick depth[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(5):1063-1074.
- [50] 马 闫,王家鼎,彭淑君,等. 大厚度黄土自重湿陷性场地浸水湿陷变形特征研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(3):537-546.
MA Yan, WANG Jiading, PENG Shujun, et al. Immersion tests on characteristics of deformation of self-weight collapsible loess under overburden pressure[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(3):537-546.
- [51] 郑建国,邓国华,刘争宏,等. 黄土湿陷性分布不连续对湿陷变形的影响研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(1):165-170.
ZHENG Jianguo, DENG Guohua, LIU Zhenghong, et al. Influence of discontinuous distribution of collapsible loess on its deformation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(1):165-170.
- [52] 崔自治,朱 楠,王晓芸. 黄土自重湿陷性评价的理论及试验研究[J]. 兰州理工大学学报, 2013, 39(6): 115-117.
CUI Zizhi, ZHU Nan, WANG Xiaoyun. Theoretical and experimental research on evaluation of loess collapsible under overburden pressure[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2013, 39(6):115-117.
- [53] 姚志华,黄雪峰,陈正汉,等. 关于黄土湿陷性评价和剩余湿陷量的新认识[J]. 岩土力学, 2014, 35(4): 998-1006.
YAO Zhihua, HUANG Xuefeng, CHEN Zhenghan, et al. New recognition of collapsibility evaluation and remnant collapse of loess[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(4):998-1006.
- [54] 王铁行,金 鑫,罗 扬,等. 考虑卸荷作用的黄土湿陷性评价方法研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(4):1281-1290.
WANG Tiehang, JIN Xin, LUO Yang, et al. A method for evaluation of loess collapse potential of unloading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(4):1281-1290.
- [55] 金 鑫,王铁行,赵再昆,等. 卸荷条件下黄土湿陷系数的计算方法及验证[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(10):1959-1966.
JIN Xin, WANG Tiehang, ZHAO Zaikun, et al. Method for calculating coefficient of collapsibility of loess under unloading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(10):1959-1966.
- [56] 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.
- [57] 王丽琴. 黄土的结构性与湿载变形特性及其评价方法研究[D]. 西安:西安理工大学, 2017.
WANG Liqin. Study on structural properties and deformation characteristics of loess under stress and moisture and its evaluation method[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2017.
- [58] DUSAN B, ZORAN B, CEBASEK V, et al. Characterisation of collapsing loess by seismic dilatometer[J]. Engineering Geology, 2014, 181:180-189.
- [59] WANG H M, NI W K, LIU H S, et al. Study of the repeated collapsibility of undisturbed loess in Guyuan, China[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2021, 80(8):6321-6330.
- [60] 孙新生. 静力触探在河南省湿陷性黄土地区的应用研究[D]. 郑州:郑州大学, 2016.
SUN Xinsheng. Research on the application of cone penetration test in Henan province's collapsible loess areas[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2016.

- [61] 黄雪峰,刘长玲,朱彦鹏,等. 三轴应力条件下黄土湿陷性试验及评价方法研究[J]. 工程勘察, 2011, 39(9):25-29.
HUANG Xuefeng, LIU Changling, ZHU Yanpeng, et al. A study of the loess collapsibility test and evaluation methods under complex stress conditions[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2011, 39(9): 25-29.
- [62] 武小鹏. 基于试坑浸水试验的大厚度黄土湿陷及渗透特性研究[D]. 兰州:兰州大学, 2016.
WU Xiaopeng. Study on the characteristics of collapse and permeability of large thickness loess ground based on water immersion test[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2016.
- [63] NIE Y P, NI W K, WANG H M, et al. Evaluation of collapsibility of compacted loess based on resistivity index[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2021, 2021: 1-11.
- [64] 王厚宇. 基于电阻率的黄土湿陷性与压实度评价方法研究[D]. 南京:东南大学, 2021.
WANG Houyu. Quantitative evaluation method of collapsibility and compaction degree of loess based on electrical index[D]. Nanjing: Southeast University, 2021.
- [65] 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.
- [66] BHUYAN H, SCHEUERMANN A, BODIN D, et al. Soil moisture and density monitoring methodology using TDR measurements[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2020, 21(10): 1263-1274.
- [67] CURIONI G, CHAPMAN D N, ROYAL A C D, et al. Time domain reflectometry (TDR) potential for soil condition monitoring of geotechnical assets[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2019, 56(7): 942-955.
- [68] 王立新,邵 帅,邵生俊,等. 西安洪庆地铁车站地基湿陷性研究[J]. 地下空间与工程学报, 2022, 18(3): 1006-1014.
WANG Lixin, SHAO Shuai, SHAO Shengjun, et al. Evaluation of foundation collapse of Xi'an Hongqing metro station[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2022, 18(3): 1006-1014.
- [69] 倪万魁,颜 斌,刘海松. 公路路基黄土湿陷性评价问题[J]. 工程地质学报, 2007, 15(4): 513-520.
NI Wankui, YAN Bin, LIU Haisong. Evaluation of collapsible loess subgrade along expressway[J]. Journal of Engineering Geology, 2007, 15(4): 513-520.
- [70] 李征征. 重塑黄土湿陷模型试验与湿陷性评价研究[D]. 西安:长安大学, 2016.
LI Zhengzheng. Study on collapsibility of remolded loess by model test and evaluation of loess collapsibility[D]. Xi'an: Chang'an University, 2016.
- [71] 方瑾瑾,冯以鑫,余永强,等. 真三轴条件下的原状黄土增湿变形特性[J]. 岩土力学, 2020, 41(4): 1235-1246.
FANG Jinjin, FENG Yixin, YU Yongqiang, et al. Wetting deformation characteristics of intact loess under true triaxial conditions[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(4): 1235-1246.
- [72] WANG L Q, SHAO S J, SHE F T. A new method for evaluating loess collapsibility and its application[J]. Engineering Geology, 2020, 264: 105376.
- [73] ZHANG Y J, HAN J L, WANG X, et al. Evaluation of loess collapsibility based on random field theory in Xi'an, China[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2022, 2022: 1-11.
- [74] WEN X, JING Y L, HU Z P, et al. Experimental study on the penetration of natural unsaturated and collapsible loess based on the permeability velocity[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2021, 25(12): 4585-4595.
- [75] 杨天亮,叶观宝. 高能级强夯法在湿陷性黄土地基处理中的应用研究[J]. 长江科学院院报, 2008, 25(2): 54-57.
YANG Tianliang, YE Guanbao. Application research for dynamically high energy level compaction in collapsed loess foundation treatment[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2008, 25(2): 54-57.
- [76] 李辉山,腾文川,赵 卿,等. 预浸水法处理湿陷性黄土地基的试验与应用研究[J]. 建筑科学, 2011, 27(5): 36-40.
LI Huishan, TENG Wenchuan, ZHAO Qing, et al. Experiment and application of prewetting method treating on collapsible loess foundation[J]. Building Science, 2011, 27(5): 36-40.
- [77] 冯志焱,林在贯,郑 翔. 孔内深层强夯法处理湿陷性黄土地基的一个实例[J]. 岩土力学, 2005, 26(11): 1834-1836, 1848.
FENG Zhiyan, LIN Zaiguan, ZHENG Xiang. An example of treating collapsible loess by super down hole deep compaction[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005,

- 26(11):1834-1836,1848.
- [78] 付红梅,中砂改良黄土的湿陷性试验研究[J]. 勘察科学技术,2016(3):6-8.
- FU Hongmei. Study on collapsibility test of medium sand improved loess[J]. Site Investigation Science and Technology,2016(3):6-8.
- [79] 何玉琪,廖红建,董 琪,等. 加筋材料改良黄土强度特性的试验研究[J]. 岩土工程学报,2021,43(增1):181-185.
- HE Yuqi, LIAO Hongjian, DONG Qi, et al. Experimental study on strength characteristics of geogrid-reinforced loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2021,43(S1):181-185.
- [80] 杨新文,张海龙,罗 扬,等. 挤密桩预处理后黄土地基灌注桩承载特性[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版),2021,53(4):485-492.
- YANG Xinwen, ZHANG Hailong, LUO Yang, et al. Bearing characteristics of cast-in-place pile in loess foundation after compacted pile pretreatment [J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2021, 53(4):485-492.
- [81] 周小松,乔建伟,夏玉云,等. SDDC 挤密桩处理湿陷性黄土地基试验研究[J]. 工程勘察,2023,51(5):7-13.
- ZHOU Xiaosong, QIAO Jianwei, XIA Yuyun, et al. Experimental study on the treatment of collapsible loess with SDDC pile[J]. Geotechnical Investigation & Surveying,2023,51(5):7-13.
- [82] 朱彦鹏,李亚胜,李京榜,等. 挤密桩法处理自重湿陷性黄土地基的试验[J]. 兰州理工大学学报,2019,45(6):133-137.
- ZHU Yanpeng, LI Yasheng, LI Jingbang, et al. Experiment on treatment of self-weight wet-collapsible loess foundation with compaction pile method[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2019, 45(6):133-137.
- [83] 杨忠诚,王毅敏,封志军. 水泥改良黄土工程特性的试验研究[J]. 路基工程,2006(2):57-59.
- YANG Zhongcheng, WANG Yimin, FENG Zhijun. Experimental study on engineering characteristics of loess improved by cement[J]. Subgrade Engineering, 2006(2):57-59.
- [84] 王任杰. 水泥改良黄土的工程特性研究[D]. 兰州:兰州大学,2021.
- WANG Renjie. Study on engineering characteristics of cement-improved loess [D]. Lanzhou: Lanzhou University,2021.
- [85] LIU H M, WANG L M, GAO P. The mechanical properties of cement reinforced loess and pore micro-structure characteristics[J]. Applied Mechanics and Materials,2014,527:25-30.
- [86] 周建基,梁收运,张帆宇,等. 石灰改良黄土的工程特性试验研究[J]. 铁道建筑,2014,54(9):105-108.
- ZHOU Jianji, LIANG Shouyun, ZHANG Fanyu, et al. Experimental study on engineering performances of lime-stabilized loess [J]. Railway Engineering, 2014,54(9):105-108.
- [87] 谢 潇,王璐瑶,邓乐娟,等. 生石灰改良黄土的微观机制试验研究[J]. 煤田地质与勘探,2021,49(6):193-199.
- XIE Xiao, WANG Luyao, DENG Lejuan, et al. Study on the microscopic mechanism of the loess improved by quicklime[J]. Coal Geology & Exploration, 2021, 49(6):193-199.
- [88] 赵少强,别大华,邓剑辰. 粉煤灰改良黄土填料的试验研究[J]. 铁道建筑技术,2006(3):47-50.
- ZHAO Shaoqiang, BIE Dahua, DENG Jianchen. A study on flyash improved loess filling material[J]. Railway Construction Technology,2006(3):47-50.
- [89] 郑 乐. 改良黄土的渗透特性研究[D]. 西安:长安大学,2021.
- ZHENG Le. Experimental study of permeability characteristics of modified loess[D]. Xi'an:Chang'an University,2021.
- [90] 郭婷婷,张伯平,田志高,等. 黄土二灰土工程特性研究[J]. 岩土工程学报,2004,26(5):719-721.
- GUO Tingting, ZHANG Boping, TIAN Zhigao, et al. Study on engineering characteristic of lime-flyash loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004,26(5):719-721.
- [91] 刘 鹏. 二灰改良黄土强度特性的试验研究[D]. 西安:西安工业大学,2018.
- LIU Peng. Experimental study on the strength of two gray modified loess under the condition of plane strain [D]. Xi'an:Xi'an Technological University,2018.
- [92] 崔素丽,黄 森,韩 琳,等. 水泥窑灰改性黄土的湿陷性和强度特性研究[J]. 水文地质工程地质,2018,45(4):73-78.
- CUI Suli, HUANG Sen, HAN Lin, et al. A study of the collapsibility and strength property of loess stabilized by cement kiln ash[J]. Hydrogeology & Engineering Geology,2018,45(4):73-78.
- [93] 司冬冬. 水泥窑灰(CKD)改良黄土的工程特性试验研究[D]. 西安:西北大学,2017.
- SI Dongdong. An experimental study of engineering

- properties of cement kiln dust-treated loess [D]. Xi'an: Northwest University, 2017.
- [94] 田高源. 赤泥改良黄土的抗剪强度和渗透特性研究 [D]. 太原: 太原理工大学, 2018.
- TIAN Gaoyuan. Study on shear strength and permeability of loess improved by the red mud [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2018.
- [95] 黄凌昱. 磷酸氢二氨加固黄土试验及机理 [D]. 淮南: 安徽理工大学, 2018.
- HUANG Lingxia. Consolidation experiment on mechanism of loess by hydroxylapatite [D]. Huainan: Anhui University of Science & Technology, 2018.
- [96] 金明亮, 王兴涛, 郑万鹏, 等. 钢渣作为胶凝剂稳定黄土路基研究与应用 [J]. 公路, 2022, 67(9): 101-108.
- JIN Mingliang, WANG Xingtao, ZHENG Wanpeng, et al. Research and application of steel slag as gelling agent to stabilize loess subgrade [J]. Highway, 2022, 67(9): 101-108.
- [97] 贾宏铮. 硅化法加固黄土过程土体抗剪强度和湿陷变形研究 [J]. 山西建筑, 2016, 42(28): 82-83.
- JIA Hongzheng. On soil shearing strength and collapsible deformation of loess consolidation process with silicification method [J]. Shanxi Architecture, 2016, 42(28): 82-83.
- [98] 蔡东艳, 韩晓雷. 水玻璃加固土的特性研究 [J]. 西安建筑科技大学学报 (自然科学版), 2004, 36(2): 233-235.
- CAI Dongyan, HAN Xiaolei. A research on the properties of loess reinforced with waterglass [J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology, 2004, 36(2): 233-235.
- [99] 刘钊钊. 木质素改良黄土力学特性及加固机理研究 [D]. 兰州: 兰州大学, 2020.
- LIU Zhaozhao. Mechanical properties and reinforcement mechanism of lignin-modified loess [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2020.
- [100] 刘钊钊, 王 谦, 钟秀梅, 等. 木质素改良黄土的持水性和水稳性 [J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(12): 2582-2592.
- LIU Zhaozhao, WANG Qian, ZHONG Xiumei, et al. Water holding capacity and water stability of lignin-modified loess [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(12): 2582-2592.
- [101] 韩领相. CONSOLID 固化剂对黄土工程性质影响的宏微观试验研究 [D]. 西安: 西安理工大学, 2021.
- HAN Lingxiang. Macro and micro experiment study on the influence of the CONSOLID system on the engineering properties of loess [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2021.
- [102] 张 耀, 胡再强, 陈 昊, 等. 酸性溶液对黄土结构改良的试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2018, 40(4): 681-688.
- ZHANG Yao, HU Zaiqiang, CHEN Hao, et al. Experimental study on evolution of loess structure using acid solutions [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(4): 681-688.
- [103] HAERI S M, VALISHZADEH A. Evaluation of using different nanomaterials to stabilize the collapsible loessial soil [J]. International Journal of Civil Engineering, 2021, 19(5): 583-594.
- [104] 唐辉雄, 曹运江, 曹 宇. 高分子稳固剂改性黄土水理性质试验研究 [J]. 建筑技术开发, 2020, 47(12): 147-149.
- TANG Huixiong, CAO Yunjiang, CAO Yu. Water-physical properties of loess soil modified by polymer stabilizer [J]. Building Technology Development, 2020, 47(12): 147-149.
- [105] 李建东, 王 旭, 张延杰, 等. F1 离子固化剂加固黄土强度及微观结构试验研究 [J]. 东南大学学报 (自然科学版), 2021, 51(4): 618-624.
- LI Jiandong, WANG Xu, ZHANG Yanjie, et al. Experimental study on strength and microstructure of loess reinforced with F1 ionic soil stabilizer [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2021, 51(4): 618-624.
- [106] 张丽萍, 张兴昌, 孙 强. EN-1 固化剂加固黄土的工程特性及其影响因素 [J]. 中国水土保持科学, 2009, 7(4): 60-65.
- ZHANG Liping, ZHANG Xingchang, SUN Qiang. Engineering properties and influencing factors of solidified loess by EN-1 solidifying agent [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2009, 7(4): 60-65.
- [107] 孔德成, 孙治国, 贾方方. 微生物诱导碳酸钙沉淀技术改良黄土湿陷性研究 [J]. 硅酸盐通报, 2022, 41(3): 969-975.
- KONG Decheng, SUN Zhiguo, JIA Fangfang. Microbial induced calcium carbonate precipitation technique for improving collapsibility of loess [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2022, 41(3): 969-975.