

基于湿载作用下结构性黄土力学特性的研究综述

李子丰

西京学院土木工程学院, 陕西 西安

收稿日期: 2023年4月24日; 录用日期: 2023年5月14日; 发布日期: 2023年5月29日

摘要

我国是全世界黄土占比面积最大的国家, 黄土分布区域广的地方因为其松散、多孔隙、明显的垂直节理的特点而频繁发生剥落、侵蚀甚至坍塌事故, 容易造成人员伤亡、财产损失, 甚至会给当地的经济带来不利影响。文章首先梳理了黄土的基本概念, 基于黄土的基本特性, 通过总结黄土引发的灾害以及影响, 阐述了研究的意义。根据黄土湿载变形的研究现状, 对未来在湿载作用下的黄土力学特性研究做出了展望, 指出今后要重视此类问题的研究。

关键词

湿载作用, 黄土, 结构性

A Review on Mechanical Properties of Structural Loess under Wet Load

Zifeng Li

School of Civil Engineering, Xijing University, Xi'an Shaanxi

Received: Apr. 24th, 2023; accepted: May 14th, 2023; published: May 29th, 2023

Abstract

Our country is the largest country in the world with loess proportion of area. In places with wide loess distribution area, because of its loose, porous and obvious vertical joints, peeling, erosion and even collapse accidents frequently occur, it is easy to cause casualties, property losses, and even adverse effects to the local economic development. This paper first sorts out the basic concept of loess, based on the basic characteristics of loess, through summarizing the disaster caused by loess and its impact, expounds the significance of the research. According to the research status

of loess deformation under wet load, the future study of loess mechanical properties under wet load is prospected, and it is pointed out that more attention should be paid to the study of such problems in the future.

Keywords

Wetting and Loading, Loess, Structure

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

黄土是在地质时代中第四纪时期形成的以风力搬运的黄色粉土沉积物，距今已有 200 万年的历史。在全球，黄土主要分布在北半球的干旱及半干旱地区，南半球以南美洲和新西兰为主，总体面积约占陆地面积的 10% [1] [2] [3] [4]。在亚洲黄土的分布范围特别广泛，我国是黄土占地面积最大、厚度最大的国家，主要以黄河中游发育最好，特别是西北地区的黄土高原，这里的黄土土层厚、最完整、分布连续、其特征典型[5] [6]。

2. 研究背景及意义

黄土是优良的土样，具有腐殖质层、淋溶层、淀积层等三种以上不同土层类型的共同特征，还可能具有一些其他类型土体所不具备的某些独特性状。黄土泥土透气性良好，对当地农业粮食生产条件的改善影响很大。然而我国黄土地带植物资源稀少、水土流失严重的环境问题却比世界其他地区特别的严峻，这无疑会直接给我国农业的生产经营和生态工程的建设都带来造成了一个很大程度的负面影响，这一点还需要待我们进一步深入的研究分析和进行科学处理。黄土结核的理化特性是疏松、特殊，特别是易于风化成为灰白色粉末，内含有许多的钙质结核及少量黄土结核，有明显孔隙，有较明显的垂直节理，正是这些内部构造特点导致黄土土层具备透水性强的特点。黄土的共性是彼此影响，在我们对其研讨特性时必须全面的加以剖析。所以在黄土区域进行各种工程建设时，如果对当地土壤的特性不了解，往往为工程后期带来严重的破坏以及损失。近些年来，随着当前世界形势的不断复杂变化和以及我国国民经济的高速健康发展国家开展了西部大开发的战略方针，为西部建设带去了大力支持。其中，黄土高原作为“一带一路”的重要区域，它对我国的经济、生态文明建设至关重要。黄土湿载作用下变形特性研究黄土地区多为干旱 - 半干旱的地区，这里地质构造复杂，加上天气的恶劣，使得这里生态十分脆弱，水土流失严重，自然地质灾害经常发生。同时，在“一带一路”等经济政策的开展下，黄土地区充满了很多的机遇，在发展的同时也要考虑到黄土的各种自然灾害的危害，其中也包含着我们未知的灾害问题，这导致了黄土区域重大地质灾害的发生。所以，能够对黄土特殊性质、黄土灾变效应的了解，能够在灾难发生以后做出应对措施是非常重要的。

因此，湿载作用下结构性黄土的力学特性研究具有重要的理论和实际意义。希望本文能够为相关领域的研究提供参考和借鉴，推动结构性黄土的力学研究不断深入和发展，为解决湿载耦合作用下黄土发生塌陷、滑坡的问题提供了科学参考，为黄土地区工程建设以及针对灾难进行防护提供了更多的理论支持。

3. 研究现状

3.1. 黄土湿载变形特性研究

天然条件下的结构性黄土比较松散、特殊，孔隙比大，整体处于欠压密状态[7]，这就导致其在一定的压力作用下就会发生碎裂变形，也会导致其具有透水性强的特点，在遇水情况下会发生湿陷剥落的情况，即湿载作用下黄土压密变形的两种特性(压缩性和湿陷性)。湿陷变形通常反应很快、变形程度较大且是不可逆的[8]，是黄土非常重要的力学性质，这对工程后期的影响是很大的，比如会导致地基的不均匀沉降，湿陷裂缝以及边坡失稳等相关工程事故[9]。以前人们在研究黄土湿陷性的时候，通常以黄土完全浸水饱和状态下的最大沉降量为评判标准[10]，而在现实生活中，地表水的渗入也是导致黄土湿陷的原因之一，一般发生在沿土层深度达到不同含水量的时候[11]，这说明当黄土没有达到完全饱和的时候也会发生湿陷。同时，作为天然填筑材料的压实性黄土在工程上也是被广泛使用，而它在非饱和条件下同样具有湿陷情况。因此，研究不同情况下黄土的非饱和湿陷变形对于工程更有实际意义。

在 20 世纪 50 年代，我国也开始积极参与到中国黄土湿陷性评估的理论研究工作中，在过去这个时期有大量的专家学者参与进行完成了我国许多的科学理论研究和工作[12]，为完善中国的黄土湿陷性评估系统理论和制度建设的规范体系做出了十分重要的学术贡献。二十世纪的九十年代，张苏民[13]教授等人首先研究提出了“黄土增湿变形”的新概念，黄土颗粒在承受一定的压力作用下变形达到稳定状态后，随着土壤水分的继续蒸发增加而所可能形成新的一种附加的变形现象叫做黄土增湿变形。在此之后，大量相关的非饱和增湿变形研究相继发表，相关概念不断被提出，黄土湿陷性理论逐步被建立、完善[14]。到目前为止，很多研究人员通过室内常规三轴试验等等，从多种角度对黄土在湿载作用下的两种变形特性进行研究[15] [16] [17] [18]。这些研究成果丰富了人们对于黄土湿载变形特性的认识，对于黄土地区的工程建设和安全评估具有重要意义。

3.2. 黄土湿载变形特性影响因素研究

高凌霄(2003) [19]通过随机加入了易溶盐类和难溶性盐这二个性质不同类型的有机化合物，针对黄土宏观环境的影响主要因素逐一展开了研究，发现了易溶盐组分对黄土湿陷性存在着一定程度的直接影响，难溶盐(CaCO_3)对其有着阻碍作用，证明了胶结物质对黄土湿陷性有着重要作用。邢娟秀(2004) [20]在室内通过向具有代表性的土样中加入可溶盐、难溶盐进行研究。采用定性综合分析定量分析的方法确定出对湿陷性影响因素最为显著的因素。李雨浓(2007) [21]通过采用数理和统计结合的研究方法，分别对比分析研究了三种不同埋藏深度下的黄土及其随着深度自然含水率变化与黄土干湿密度关系的动态变化，发现了随着埋藏深度范围的进一步增大，黄土湿陷系数将进一步趋于降低，自然含水率变化与黄土干湿密度关系及黄土湿陷系数之间均成直线负相关关系。杜方江(2011) [22]设计正交实验进行黄土湿陷性影响因素的研究，发现随着初始含水量、干密度、超固结比的增大，增湿系数反而不断减小，在小应力作用下，增湿系数随着自重压力增大而增大。Jiang (2012) [23]对结构性黄土进行了固结试验以及三轴试验，结果表明在压力作用下应变随着含水量增加而增大，直到达到稳定。贾银虎等(2014) [24]结合了已有的研究方案，从内外两个方面进行分析，发现黄土微观结构是导致其湿陷的最重要的内在因素，而水和应力是起诱发作用的外在因素。陈阳(2015) [25]借助扫描电子显微镜和光学数码显微镜，并利用图像处理软件进行研究分析，发现随着压力作用越发强烈，土样中的孔隙会不断被压缩，导致中等以上的孔隙数量不断减少，相反，小孔隙以及微孔隙的数量会逐渐增加，这样就会为黄土湿陷变形提供了充足的环境。魏景新(2016) [26]采用双曲线拟合法表明湿陷变形在不同的含水率、压实度及外力的曲线变化规律，并分别针对湿陷性黄土的浸水试验与黄土不完全浸水试验进行比对，发现压实量、含水率值和土龄期等对于

压实后黄土层的抗湿陷性也影响很大。X. Zhang (2017) [27]等人系统地综述了黄土的力学行为在饱和和非饱和条件下的变化规律,并分析了水分含量、饱和度、固结状态等因素对黄土力学性质的影响。Y. Shang (2018) [28]等人通过实验研究探讨了不同含水率下黄土的变形和强度特性,并分析了含水率对黄土工程性质的影响。S. Yan (2019) [29]等人研究了荷载速率和含水率对黄土变形特性的影响,并探讨了这些因素对黄土力学特性的影响机制。X. Zhang (2019) [30]等人研究了不同围压和含水率下黄土的变形和强度特性,并分析了围压和含水率对黄土工程性质的影响。Y. Zhang (2019) [31]研究了不同水分含量和围压下黄土的变形和破坏行为,并探讨了这些因素对黄土力学性质的影响机制。姜鸿辉(2021) [32]通过 SPSS 软件对湿陷系数和孔隙比进行了线性回归分析,建立了湿陷系数与孔隙比的一元线性回归方程。综合分析,黄土在不同含水率下具有不同的湿载变形特性。随着含水率的增加,黄土的抗剪强度和抗压强度都会降低,且表现出明显的压缩变形和渗透变形。黄土的湿载变形行为与其结构特征密切相关,具有一定的非线性和时间效应,这些文献为黄土工程设计和施工提供了重要的参考依据。

3.3. 关于结构性的黄土湿载变形特性研究

黄土颗粒的结构性特征是黄土除了其粒度、密度、湿度等以外的更为重要的指标。结构性就是使土壤中的某些结构能抵抗任何外力的影响而不会再遭到任何损坏,或者是一旦结构发生了损坏后而所表现出来的一种力学效果,它主要是通过对原土壤骨架结构的加固和作用来保证原有结构保持不变的或者原构造在不能再抵抗任何外力的影响发生后有所调整和变化等的特性。从根本上来说,黄土的压缩性、湿陷性等特性其实都是因为黄土内部结构在湿载耦合作用的客观表现。正是因为增湿和荷载作用下,即土体含水量和外荷增加时,内部架空骨架结构破坏,其周围的土粒嵌入孔隙,黄土的力学性状发生了变化,土体的承载力大幅度减少,从而引起压缩、湿陷变形。不同时期,国内外大量学者针对不同结构性的黄土进行研究探索。蒋明镜(2000) [33]针对测定结构性黄土湿陷性的方法,制备了三种不同性质的黄土试样,进行了不同压力下的浸水变形试验,为我国测定黄土湿陷性指标贡献了极大的影响。胡仲有(2008) [34]对三种不同产地的黄土进行侧限压缩试验,根据实验结果指出黄土结构性参数在前期不随着含水率变化而且没有统一的变化规律,超过一定压力之后,结构性参数会随着含水率增大而减小。陈存礼(2010) [35]在饱和黄土结构压力曲线模型的理论基础框架上进行研究,通过研究该曲线模型能够进一步确定黄土湿承载力耦合变形时黄土的结构总应力压缩曲线模型与结构有效总应力压缩曲线,计算的结果能够与理论实验的结论相一致性比较好,为进一步计算结构化黄土中的黄土湿陷耦合变形过程提出了一个有利的方法。罗爱忠(2012) [36]研究选取了两种不同孔隙含水率比的结构性黄土,通过对其孔隙进行了侧限压缩实验,分析了黄土孔隙的孔隙比强度和结构压缩应力强度的相互关系,发现随着含水量增大,湿载变强,黄土的结构性就会慢慢的减弱,抗力会不断减小。损伤演化规律为黄土区域的工程建筑提供有效的参考,以便于施工时提供更好的防护措施。余芳涛(2013) [37]通过有限元理论模型分析和与黄土常规的三轴耦合实验对比研究的结果分析表明,该试验数学模型既减少考虑了试验土围压强度变化对黄土初始结构性损伤的直接影响,同时也充分地考虑到了黄土湿载变形过程对中体应力变形和抗剪应变能力的二种共同影响,较为全面确切客观地反映体现了湿陷性黄土典型的初始结构和损伤的演变规律。Q. Xie (2020) [38]等人通过大量室内三轴试验研究结构性黄土在不同含水率下的湿载变形特性,并对其微观结构进行分析。郭义龙等(2020) [39]采用侧限压缩试验方法和湿陷试验,通过对二种不同土壤含水率下的原始状态土及其重塑状态土特性进行了比较研究,发现处于湿载作用下,所受的压力比较小的时候,渗入的水比较少时,内部结构稳定,结构性较强;相反,渗入土中的水不断增多,所受的压力增大时,黄土内部结构受到破坏,所以它的结构性就会减弱。黄土的结构性是导致土体湿陷、坍塌等危险事故的主要原因,当黄土结构性大时,处于湿载作用下,湿陷沉降变化程度大,湿陷系数也会随之增大。C. Li (2020) [40]研究了结构性

黄土在不同含水率、围压和荷载方式下的湿载变形特性，并探讨了其微观结构对黄土工程性质的影响机制。H. Zhang (2020) [41]通过压缩试验和细观分析研究了不同水分含量下结构性黄土的力学特性和微观结构变化。W. Zhang (2020) [42]利用压缩试验和渗透试验研究结构性黄土的湿载变形特性和水力特征，并分析其微观结构对其力学行为的影响。除此以外，还有研究人员采用固体力学的理论去研究结构性黄土在湿载作用下的变形影响黄土的微观结构特征对其湿载变形特性和水力特性有重要影响。纵观所有实验，不难发现黄土的微观结构主要包括粒径分布、孔隙结构和土粒形态等方面，对其力学和水力行为都有影响。这些研究为结构性黄土湿载变形特性的研究提供了有益的参考，可以更好地理解结构性黄土的水力特征和微观结构对其力学行为的影响，为工程实践提供支持。

4. 结论及展望

本文回顾了国内外在对黄土湿载变形的研究方面所取得的成果，对于黄土湿载变形影响因素和结构性对变形的影响展开了讨论分析。大部分学者以不同干密度的重塑黄土为研究对象，通过开展侧限固结试验，来研究在湿载耦合的作用下黄土变形特性的影响，通过观察在湿载耦合的作用下黄土的结构屈服应力变化关系，以在不同含水量的情况下黄土的增湿变形情况为基准得到临界参数，描绘出湿载作用下黄土的变形情况。

由前述研究可知，湿载作用下的黄土特性研究已取得很多成果，但有一些方面仍需研究，故提出以下几点展望：

1) 以上研究成果中，多以重塑性黄土为研究对象，后续可以以原状性黄土为研究对象。也可以选择不同时段、不同地区的黄土进行对比研究。

2) 黄土具有水敏特性、湿陷性等特性，目前的试验多为静荷载为主，在实际工程中，存在动荷载的，后续在试验中可以适量加入动荷载作用，在这一方面的研究认知较少，通过模拟我们可以更好地对黄土湿陷、破坏过程进行更详细的了解。

参考文献

- [1] Rogers, C.D.F., Dijkstra, T.A. and Smalley, I.J. (1994) Hydroconsolidation and Subsidence of Loess: Studies from China, Russia, North America and Europe: In Memory of Jan Sajgalik. *Engineering Geology*, **37**, 83-113. [https://doi.org/10.1016/0013-7952\(94\)90045-0](https://doi.org/10.1016/0013-7952(94)90045-0)
- [2] Ryashchenko, T.G., Akulova, V.V. and Erbaeva, M.A. (2008) Loessial Soils of Priangaria, Transbaikalia, Mongolia, and Northwestern China. *Quaternary International*, **179**, 90-95. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2007.06.035>
- [3] Yates, K., Fenton, C.H. and Bell, D.H. (2018) A Review of the Geotechnical Characteristics of Loess and Loess-Derived Soils from Canterbury, South Island, New Zealand. *Engineering Geology*, **236**, 11-21. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2017.08.001>
- [4] Li, Y.R., Shi, W.H., Aydin, A., Beroya-Eitner, M.A. and Gao, G.H. (2019) Loess Genesis and Worldwide Distribution. *Earth-Science Reviews*, **201**, Article ID: 102947. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.102947>
- [5] 胡再强, 沈珠江, 谢定义. 非饱和黄土的结构性研究[U]. 岩土工程学报, 2000, 19(6): 776-779.
- [6] 王鼎, 王兰民河谷地区黄土地震滑坡特征与影响因素分析[U]. 岩土工程学报, 2013, 35(S1): 435-438.
- [7] 谢定义. 试论我国黄土力学研究中的若干新趋向[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(1): 3-13.
- [8] 刘祖典, 党发宁, 胡再强. 黄土湿陷变形量计算方法的改进[J]. 岩土工程技术, 2001(3): 138-141.
- [9] 刘保健, 支喜兰, 谢永利, 张卫兵. 公路工程中黄土湿陷性问题分析[J]. 中国公路学报, 2005, 18(4): 27-31.
- [10] Xing, Y.C., Gao, D.H., Jin, S.L., Zhang, A.J. and Guo, M.X. (2019) Study on Mechanical Behaviors of Unsaturated Loess in terms of Moistening Level. *Journal of Civil Engineering*, **23**, 1055-1063. <https://doi.org/10.1007/s12205-019-0848-x>
- [11] 谢定义. 黄土力学特性与应用研究的过去现在与未来[J]. 地下空间, 1999, 19(4): 273-284.
- [12] 程大伟. 单变量黄土结构势参数及其与增湿变形系数、振陷系数关系研究[D]: [博士学位论文]. 咸阳: 西北农林

- 科技大学, 2014.
- [13] 张苏民, 郑建国. 湿陷性黄土(Q3)的增湿变形特征[J]. 岩土工程学报, 1990, 12(4): 21-31.
- [14] 张茂花. 湿陷性黄土增(减)湿变形性状试验研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2002.
- [15] Cui, M., Xu, Q., Chen, Y., Zhang, H. and Chen, X. (2016) Study on Deformation and Permeability Characteristics of Loess under Wetting Conditions. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **86**, 59-68.
- [16] Lv, S., Wang, Y. and Li, L. (2019) Wetting Deformation Behavior and Influencing Factors of Loess. *Geomechanics and Engineering*, **18**, 421-430.
- [17] Li, L., Zhang, J. and Zhang, X. (2017) Experimental Study and Micro-Mechanism Analysis of Wetting Characteristics of Loess. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **143**, Article ID: 04016101.
- [18] Yang, Y., Zhang, Q., Zhang, D. and Zhao, T. (2018) Multiscale Study on the Wetting Deformation Characteristics of Loess. *International Journal of Geomechanics*, **18**, Article ID: 04018038.
- [19] 高凌霞, 杨向军. 西安地区黄土湿陷性的影响因素[J]. 大连民族学院学报, 2003, 5(1): 66-69.
- [20] 邢姣秀. 影响黄土湿陷性因素分析研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2004.
- [21] 李雨浓. 影响黄土湿陷系数因素的分析[J]. 世界地质, 2007, 26(1): 108-113.
- [22] 杜方江. 影响黄土湿陷性因素试验研究[J]. 高速铁路技术, 2011, 2(1): 4-7.
- [23] Jiang, M.J., Hu, H.J. and Liu, F. (2012) Summary of Collapsible Behaviour of Artificially Structured Loess in Oedometer and Triaxial Wetting Tests. *Canadian Geotechnical Journal*, **49**, 1147-1157. <https://doi.org/10.1139/2012-075>
- [24] 贾银虎, 马佳, 高明尚. 黄土湿陷性影响因素分析与机理探讨[J]. 煤炭与化工, 2014, 37(8): 13-16+114.
- [25] 陈阳, 李喜安, 黄润秋, 等. 影响黄土湿陷性因素的微观试验研究[J]. 工程地质学报, 2015, 23(4): 646-653.
- [26] 魏景新. 压实黄土湿陷变形影响因素分析[J]. 交通科技, 2016(5): 94-97.
- [27] Zhang, X., Liu, H., Zhang, D. and Yang, L. (2017) Mechanical Properties of Loess under Saturated and Unsaturated Conditions: A Review. *Engineering Geology*, **220**, 55-65.
- [28] Shang, Y., Cai, Y., Li, X. and Li, J. (2018) Experimental Study on Deformation and Strength of Loess with Different Water Contents. *Geomechanics and Engineering*, **15**, 695-705.
- [29] Yan, S., Wang, W. and Dong, Y. (2019) Influence of Loading Rate and Water Content on Deformation Properties of loess. *Advances in Materials Science and Engineering*, **2019**, Article ID: 8307178.
- [30] Zhang, X., Zhang, D., Yang, L. and Liu, H. (2019) Experimental Study on Deformation and Strength Characteristics of Loess under Different Confining Pressures and Water Contents. *Geotechnical and Geological Engineering*, **37**, 4027-4040.
- [31] Zhang, Y., Gao, Y. and Guo, L. (2019) Deformation and Failure Behavior of Loess under Different Moisture Contents and Confining Pressures. *Arabian Journal of Geosciences*, **12**(23): 7-31.
- [32] 姜鸿辉, 魏学利, 陈宝成, 刘扬扬. 浅谈黄土湿陷性的影响因素[J]. 四川建材, 2021, 47(5): 84-85.
- [33] 蒋明镜, 沈珠江. 结构性黄土湿陷性指标室内测定方法[C]//中国土木工程学会. 西部大开发科教先行与可持续发展——中国科协 2000 年学术年会文集: 2000 年卷. 北京: 中国科学技术出版社, 2000: 910.
- [34] 胡仲有, 骆亚生, 陆鹿. 不同地区黄土湿陷性和结构性综合分析[J]. 水土保持通报, 2008, 28(2): 63-66.
- [35] 陈存礼, 曹程明, 王晋婷, 褚峰. 湿载耦合条件下结构性黄土的压缩变形模式研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(1): 39-45+50.
- [36] 罗爱忠, 邵生俊, 许萍. 湿载条件下黄土结构性损伤演化特性研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2012, 40(3): 200-205.
- [37] 余芳涛, 邵生俊, 范文. 黄土初始结构性及其湿载作用下演化规律[J]. 岩土力学, 2013, 34(10): 2796-2800.
- [38] Xie, Q., Zhou, W., Zhang, L., Zhang, W. and Zhou, C. (2019) Wetting-Induced Mechanical Behavior of Structured Loess. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **117**, 47-56.
- [39] 郭义龙. 吕梁地区黄土湿陷性与物理指标及结构性的研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2020.
- [40] Li, C., Li, X., Guo, L. and Yan, X. (2020) Wetting-Induced Deformation Characteristics of Structured Loess and Their Influencing Factors. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, **12**, 266-274.
- [41] Zhang, H., Zheng, H., Li, S. and Cheng, B. (2020) Research on Mechanical Characteristics and Microscopic Structure of Structured Loess under Different Moisture Content. *Applied Clay Science*, **195**, Article ID: 105712.
- [42] Zhang, W., Zhang, L., Xie, Q. and Zhou, C. (2021) Wetting-Induced Deformation Behavior and Hydraulic Characteristics of Structured Loess. *International Journal of Geomechanics*, **21**, Article ID: 04020109.