

探究黄土湿陷性和结构性关系的研究综述

袁野

西京学院土木工程学院, 陕西 西安

收稿日期: 2023年4月25日; 录用日期: 2023年5月15日; 发布日期: 2023年5月30日

摘要

湿陷性是一种重要的力学性质, 在黄土被淹后, 它的发展速度和数量都非常大; 对项目的建设造成了很大的影响。造成黄土湿陷的主要因素是黄土的结构突发性断裂。在此基础上, 国内外学者在黄土的结构与湿陷方面进行了大量的探讨。通过对黄土的结构强度的定义, 结合前人的研究, 将其与湿陷性结合, 并结合其构造特征, 对其特征进行了分析。

关键词

黄土, 土的结构性, 土的湿陷性, 结构强度, 本构模型

A Review of the Research on Exploring the Relationship between Loess Wet Depression and Structurality

Ye Yuan

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

Received: Apr. 25th, 2023; accepted: May 15th, 2023; published: May 30th, 2023

Abstract

Wetness is a powerful characteristic of loess. After the loess was flooded, it develops rapidly and has a large quantity, which has a severe impact on engineering construction. The main factor causing loess collapse is the sudden structural fracture of loess. On this basis, scholars at home and abroad have studied the structure of loess and the collapsibility was discussed. Based on the definition of structural strength of loess and previous studies, it is combined with collapsibility and its structural characteristics, its characteristics are analyzed.

Keywords

Loess, the Structure of Soil, Wetness of Soil, Structural Strength, Constitutive Model

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

中国的湿陷性黄土地域广阔,在其区域内,因其湿陷引起的施工和施工灾害时有发生,给社会经济带来了极大的影响。黄土的湿陷性是指在受重力和外部载荷的情况下,由于受重力和外部载荷的影响,使其快速地破裂而产生塌陷。“湿陷性”一语既是黄土性质的重要体现,也是它区别于其它塌陷的因素——它是由浸泡引起的。从黄土的湿陷性质的界定可知,其产生是由于其结构的突变,因此从构造层次上对其进行分析十分有意义。

2. 理论

2.1. 土结构性的概念

土壤结构特性是土壤中的微粒或微粒集合物及其内部空隙的大小、形状、排列组合和连接等的综合性特性。所以,土壤结构不仅要包含结构、孔隙等的结构特点,还要考虑颗粒间的结合特性。把孔隙看成是一个表现粒子分布的正方形,则土壤的结构特性必须包含粒子的分布特性和连接特性。

2.2. 土结构性的历史进程

微构造性研究的初步阶段(20年代中期~50年代初)

1925年,土力学的创始人太沙基[1]提出了土壤微观结构的概念和观念。在此阶段,主要是通过观察土壤微观结构,探讨其对土体力学性能的影响。

构造性研究的深化阶段(50年代中期~60年代后期)

随着科学技术的发展,光学显微镜、偏光显微镜、X射线衍射等已被大量地用于土壤微观结构的研究。常宝琦、林崇义等人认为,土壤结构是颗粒的分布规律和颗粒之间结合特性的规律的总称,土壤结构可划分为结构和粘聚性两类,前者纯粹是几何特性,后者则是土体之间的相互影响而产生的。并对黄土颗粒间的连接特性及应力、变形特性进行了分析。

土构造性定量化[2]研究的初步阶段(60年代末~80年代中期)

在这一时期,对土壤结构耦合特性进行力学仿真的探讨也日益受到关注,并有许多不同的结构模型被提出。在土壤结构方面,典型的有土壤结构的显微影像定量分析和土壤微结构的应力计算。这两种方法对后期土壤结构的研究都产生了重要的作用。

土构造性定量化研究的开展阶段(80年代中期至今)

在这一时期,虽然对土壤结构特征的研究方法和深度都在不断提高,但土壤类型的研究范围也不断扩大。利用计算机图像技术对微观结构的变形进行定量,为进一步探讨微观结构的地质结构特征奠定了基础。通过对各种土壤微观结构的分析,可以为土壤结构的力学模式的构建奠定基础。以土的力学性质为基础,建立了一种新的结构破坏模式。

2.3. 黄土结构性和结构强度

土壤的结构特征是由组成土壤骨骼的微粒和聚集物及骨骼微粒间的孔隙大小、形态、排列和连接等方面的综合性特征[3]。结果表明, 土壤的结构包含了土壤的骨架和它们的空间的空间分布, 以及从土壤的力学观点来看, 土壤中的结合特性。孔隙是土中粒子的分布特性(几何特性)和结合特性(机械特性)等。从根本上讲, 土壤的宏观机械性能依赖于土壤的结构。土壤的结构特征可以从某种程度上反应颗粒粒度、密度和水分。

在非饱和土中, 其结构强度[4] [5]是胶结材料在产生时产生的结合力, 这种结合是结构性粘土独有的, 随着土壤的结构发生或消亡。由于大部分的土壤存在于干燥、半干旱的气候环境, 因此其主体骨架以颗粒为主, 而在主干骨架之间则以架空构造为主。而在骨料结合部位, 以较少的直径、较易溶解的胶质粒子与其他物质组成胶合, 其结合强度称为非饱和土的结构强度。

黄土是一种水敏性物质, 它的独特构造决定了它对水分的作用。随着水分含量升高, 可溶盐类逐步溶出, 胶结材料发生松弛, 粘附性减弱; 最后导致了强度下降。

关于黄土结构的研究有[6] [7] [8]; 黄土的微观结构研究[9] [10] [11] [12]、结构力学研究模式[13] [14]和黄土结构性力学实验[15] [16]。从土壤结构学的发展历程中, 我们可以看到一个逐步了解土壤结构的进程。从对土壤结构特征的认识和微观结构的初步研究, 到对微观结构形式的理解, 探索定量表达的途径, 以及对土壤的微观结构特征的分析, 逐步建立起一个整体的结构体系, 以及对黄土结构性的定量描述。

3. 方法

3.1. 土结构性研究方法

3.1.1. 土结构性本构模型的研究方法

在过去的十多年里, 土体结构本构模型[17]的研究取得了很大进展, 国外已有大量的学者提出了大量的土体结构本构模型。

1) 从微观的观点, 结合分形理论、突变理论等相关非线性理论, 将微结构参数和宏观力学参数[16]结合起来, 进行了深入的研究。微观结构学[18]是 20 世纪 20 年代发展起来的一种微观结构学研究方法, 它将微观结构视为土壤结构的代名词, W. L. Kubiena [19]是土壤微观形态学的创始人, 从土壤学的角度出发, 首次系统、全面地开展了土壤的微观结构特征及土壤微结构形态的研究, 总结了土壤微结构形态描述的大量术语, 并建立了一套土壤微结构形态描述体系, 为土壤微结构分类提供了重要依据。但是, 由于试验技术复杂、精度高, 所建立的土体结构本构模型与实际工程相比仍有一定差距。2) 1976 年, Dougill [20]首次将损伤的概念引入到了混凝土力学的研究中, 基于渐进断裂的概念研究了混凝土的破坏问题。将损伤力学、扰动状态、多屈服面理论等应用于固体材料力学的发展。本文旨在运用数学力学的方法, 建立一种能较好地描述土体在应力作用下的变形与破坏的力学模型, 从而得出并反映其宏观力学特性。它受土力学中的规律性的影响, 具有现代力学的重要意义, 但要准确地反应出结构的结构特征和结构特征, 以及在干扰下的变形规律。3) 用土力学的方法[21], Duncan-Chang 模型通过常规三轴试验描述了土的压硬性剪软性。主要是对结构土与变形土进行对比实验, 得到能反映结构破坏的结构参数。或仅限于描述各种构造类型的土壤有不同的力学法则, 或仅就特定的土壤特性, 给出相应的描述参数, 如构造强度、前期固结压力、湿陷系数; 从整体上讲, 敏感性、液化程度等方面还缺乏系统、全面的研究。

3.1.2. 微结构本构模型的研究方法

微型结构[22] [23]本构模式是通过对土壤微观结构及土壤物理、化学特性的分析, 来模拟土壤的宏观机械性能。其基本思想来源于泰勒所提的材料在各个方向上的微滑动表面的应力-应变的变化规律。土

的微观结构模式大都是为重建或扰动而构建的，但很少有关于结构的微观结构模式，典型的是下面这两种模式。

苗天得等[24] [25]在 1999 年提出了一种以微结构突变失稳假设为基础的全失陷变形黄土的本构关系。该模式适用于湿土，即一种典型的结构土，该土的形成对于其它结构土(如软粘土、红土)都有作用。

1) 信息抽取。要想对其进行完整的形体和能量特性的综合刻画，必须不断地改进现有的结构定量信息抽取技术，不断拓展新的方法。

2) 微观结构动力学观察。由于受观察条件的制约，一般仍以并行试验为主，难以进行真实的动力学观察。

3) 尺度影响的显微结构学。微观结构学是从微观上对土壤结构进行的一项研究，在此基础上，从微观到微观的联系，尺度效应，以及与土壤各项物理性质之间的联系，都需要进行更多的研究。

4) 微观机械模式[26] [27]。利用土壤微观结构的量化分析结果，对土壤的变形、强度、蠕变等进行了分析，并对其进行了微观分析。虽然美国 Bazan 从 80 年代开始改进 Taylor 的微模型，获得了在各个方向上的材料的应力 - 应变的联系，而国家的施斌也提出了相应的计算公式；但是，该方法在实际应用中仍存在一些问题，需要进行深入的探讨。

3.2. 固体力学的研究方法

3.2.1. 基于损伤理论的结构本构模型

珠江、章为民于 1988 年率先建立了土壤破坏学说，他们首次将一种可视为自然的理想原状土(可以看作是自然的沉积土)和一种可以称为塑性土的完美破坏土壤。而实际的土壤的变形与破坏可以看作是从原始土壤向受损土壤演化的演化。自 1993~1993 起，珠江等人根据损伤机理，建立了关于结构性粘土的复合物模型和叠砌模型。其中复合体模型包括弹塑性损伤模型、非线性弹性损伤模型和弹粘塑损伤模型。

1) 堆砌体模型[28]

该方法的基本思想是：假设整体的应变增量是两个部分组成的，一个是由于有效的应力增大而产生的，可用现有的弹性模型来求解；另外一部分原因是因为破碎的粒子。

2) 损伤学说的缺点[29]-[36]

在应力作用下，破坏模型仅反映了材料的破坏情况，很难对某些材料进行加载后的应力增加进行仿真，比如在压缩实验中；在软质或松沙中，其强度会被加强。此外，也很难模仿某些物质在以前被干扰时变得柔软，然后再变得更强的情况。为了克服这些缺点，Desai 引入了干扰态的概念，并将其应用于土壤结构的本构关系中。

3.2.2. 基于扰动状态概念的结构本构模型

扰动状态的概念[37] (Disturbed State Concept 简称 DSC)最初是美国知名的 C.S·Desai 在 1974 年提出的，它是一种用于研究物质受到力干扰的本构模型。这种方法既能模仿材料的破坏，又能模仿其强度，可以很好地解决损伤的不足。在 1992，Desai 提出了一种新的结构力学模型，并将其用于无粘性土、砂土和粘性土；在此基础上，利用扰动状的基本方程式，利用扰动状态的概念，建立了地基土的压实模式。

尽管扰动状态的概念是一个不错的、有许多优势的学说，但是用它所构建的本构模式与破坏理论相同；它很难克服多个参数的缺陷，从而在实践中受限。

4. 从结构方面出发解释黄土的湿陷性

引起黄土发生湿陷的因素有黄土自身的结构、外界荷载 和水的作用，前者是内因，后两者属于外因，是黄土湿陷性的诱发因素。黄土的构造是决定其湿陷性质的最重要的因子。侯晓昆[38]对黑方台黄土在湿

陷期和湿陷期后的显微组织进行了观测，并进行了孔隙统计和分析，结果表明：在湿润状态下，在湿润状态下，凝结物的数量会增加，而百分数最大时的孔直径则会减少，而微孔则会增加。其中，对黄土的湿陷作用最大的是大孔和中孔。刘海松等[39]人对西安—禹门口高速富平段的黄土和浸渍后的黄土进行了电子显微镜观察，结果表明：在土壤浸泡后，土壤中的主要成分是由点触面引起的矿物碎片和集粒结合物软化和溶解，同时软化和破坏了土壤粒子的整体结合，从而削弱了土壤粒子的整体结合能力，从而导致了粒子的分布；土壤中的矿物组成会因水分的影响而溶出或滑入土壤的大孔隙和中孔隙，从而导致其结构的强度进一步下降，从而导致土壤的粘结破坏，从而产生湿陷。黄土的湿陷特性本质上是其强度急剧下降的一个重要阶段。胡再强利用三轴渗流实验和扫描电镜观察，对黄土的结构和应力状况进行了研究。在对黄土湿陷度的外部因素中，由于受力的大小和含水量的大小几乎成正比。受力的大小对土壤的含水量起着重要作用，而土的初始含水量则是由土壤的压实和湿沉降引起的变形成正比。当黄土的初始水分含量接近或接近饱和时，黄土的分布变化随着时间的推移已经趋于平稳，土体孔隙的减少也已经完成，土壤的粒径和各类粘结的破坏都已经结束，其对应力场的强度较小，因此，对水分的敏感性降低，对黄土的湿陷随着湿度的影响较小。在相同或近似的初始湿度下，随着结构强度的增加，黄土的湿沉降因子逐渐减小。这主要是由于在含水量相近的情况下，黄土的原始形态、孔隙、胶结材料等发生了类似的改变。在此条件下，结构强度对土壤颗粒含量的变化、结构破坏以及孔隙的充填都起到了很好的效果，结构的强度对土体结构的粘合和粘合能力都有较大的影响。

5. 结论

通过一系列的数据研究，对黄土的结构强度与结构强度之间的关系进行了分析，指出了黄土的结构强度与结构强度之间的关系。随着初始含水量的增加，其结构强度降低，其湿陷系数降低；对黄土的湿陷性起重要作用的是大孔隙和中孔隙，随着中孔和大孔隙的增多，湿陷系数也随之增大。黄土的湿陷性是由各种物理、化学等复杂的过程所共同决定的。随着我国在湿陷性黄土地区的不断发展，对其成因机制进行深入的探讨，正确评估其湿陷性，合理控制其湿陷变形，对于黄土地区的工程建设具有极为重要的意义。在黄土结构性与湿陷性的关系的基础上，还要对其进行图像分析，并对其微观结构进行更为细致的统计与分析，并结合其地质、环境等方面对其进行更进一步的研究，以得出较为完善的结论。并且以上所述的本构模型已在工程实践中得到了应用，并取得了良好的结果，但与实际应用仍存在着一定的差距。本文认为，模型是否能够被广泛地应用和推广，取决于模型的合理性、对象的适用性和模型参数的获取。只有如此，方能使其更好地运用于实际的工程计算和设计中。

参考文献

- [1] Andrade, J.E., Gu, Z., Monfared, S., Mac Donald, K.A. and Ravichandran, G. (2022) Measuring Terzaghi's Effective Stress by Decoding Force Transmission in Fluid-Saturated Granular Media. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, **165**, Article ID: 104912. <https://doi.org/10.1016/j.jmps.2022.104912>
- [2] 黄文雄. 考虑密实度和应力水平效应的粗粒土定量化本构模拟[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(5): 798-804.
- [3] 齐吉琳, 谢定义, 石玉成. 土结构性的研究方法及现状[J]. 地震工程学报, 2001, 23(1): 99-103.
- [4] Rivera, V.R., Navarro-Noya, Y.E., Dendooven, L. and Guido, M.L. (2023) Land-Use Change Alters the Bacterial Community Structure, but Not Forest Management. *Folia Microbiologica*, **68**, 277-290. <https://doi.org/10.1007/s12223-022-01009-9>
- [5] 胡志娥, 肖谋良, 丁济娜, 季剑虹, 陈剑平, 葛体达, 鲁顺保. 长期覆膜条件下农田土壤微生物群落的响应特征[J]. 环境科学, 2022, 43(10): 4745-4754.
- [6] 党进谦. 非饱和黄土的结构强度及其作用[J]. 西北农业大学学报, 1998, 26(5): 48-51.
- [7] Li, D., Shi, C., Ruan, H. and Li, B. (2022) Shear Characteristics of Soil—Concrete Structure Interaction Interfaces.

Applied Sciences, **12**, Article No. 9145. <https://doi.org/10.3390/app12189145>

- [8] Liang, C., Wu, Y., Liu, J., Chen, D. and Zhu, Y. (2022) A Critical Review on Soil Structure: Research Methods, Structured Indexes, and Constitutive Models. *Arabian Journal of Geosciences*, **15**, Article No. 1509. <https://doi.org/10.1007/s12517-022-10773-4>
- [9] 骆亚生, 张爱军. 黄土结构性的研究成果及其新发展[J]. 水力发电学报, 2004, 23(6): 66-69.
- [10] Xu, L., Xing, X., Bai, J. and Li, D. (2022) Soil Aggregate Structure, Stability, and Stoichiometric Characteristics in a Smelter-Impacted Soil under Phytoremediation. *Frontiers in Environmental Science*, **10**, Article 900147. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.900147>
- [11] 胡再强, 沈珠江, 谢定义. 非饱和黄土的显微结构与湿陷性[J]. 水利水运科学研究, 2000(2): 68-71.
- [12] 高凌霞. 黄土湿陷性的微结构效应及其评价方法研究[D]: [博士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2011.
- [13] 苏英, 刘俊峰. 黄土的湿陷性与显微结构特征研究——以咸阳市区为例[J]. 宁夏大学学报(自然科学版), 2007, 28(3): 282-285.
- [14] 唐玉龙, 周飞飞. 结构性黄土的修正 Duncan-Zhang 模型[J]. 兰州理工大学学报, 2012, 38(2): 106-109.
- [15] 褚峰, 张宏刚, 邵生俊. 陇东 Q3 结构性黄土压剪损伤本构模型试验研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(10): 3855-3870.
- [16] 刘坤. 非饱和黄土的结构性试验研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安建筑科技大学, 2008.
- [17] Ferreira, B.P., Alves, A.F.C. and Pires, F.A. (2023) An Efficient Finite Strain Constitutive Model for Amorphous Thermoplastics: Fully Implicit Computational Implementation and Optimization-Based Parameter Calibration. *Computers & Structures*, **281**, Article ID: 107007. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2023.107007>
- [18] 王国欣, 肖树芳. 土结构性本构模型研究现状综述[J]. 工程地质学报, 2006, 14(5): 620-626.
- [19] 施斌, 李生林, Tolkachev, M. 粘性土微观结构 SEM 图象的定量研究[J]. 中国科学(A 辑 数学 物理学 天文学 技术科学), 1995, 25(6): 666-672.
- [20] 任晓丹. 损伤力学理论应用于土木工程研究进展[J]. 科技导报, 2021, 39(15): 84-94.
- [21] 杨光华. 土力学发展的四个阶段的思考[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(9): 1730-1732.
- [22] 龚晓南, 熊传祥, 项可祥, 候永峰. 粘土构造性对其力学性质的影响及形成原因分析[J]. 水利学报, 2000(10): 43-47.
- [23] 谢定义, 齐吉琳. 土构造性及其定量化参数研究的新途径[J]. 岩土工程学报, 1999(6): 651-656.
- [24] 苗天德, 忠玉, 任九生. 湿陷性黄土的变形机理与本构关系[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(4): 383-387.
- [25] 饶为国, 赵成刚, 王哲, 尤昌龙. 一个可考虑构造性影响的土体本构模型[J]. 固体力学学报, 2002, 23(1): 34-39.
- [26] Medina, C.D., Herrera, R.A. and Beltran, J.F. (2023) Constitutive Model for Superelastic Shape Memory Alloys Considering Strength and Stiffness Degradation and Residual Strain: An Empirical Approach for Engineering Applications. *Engineering Structures*, **283**, Article ID: 115810. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.115810>
- [27] Maia, M.A., Rocha, I.B.C.M., Kerfriden, P. and van der Meer, F.P. (2023) Physically Recurrent Neural Networks for Path-Dependent Heterogeneous Materials: Embedding Constitutive Models in a Data-Driven Surrogate. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, **407**, Article ID: 115934. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2023.115934>
- [28] 沈珠江. 关于破坏准则和屈服函数的总结[J]. 岩土工程学报, 1995(1): 1-8.
- [29] 沈珠江. 构造性粘土的弹塑性损伤模型[J]. 岩土工程学报, 1993(3): 21-28.
- [30] 罗刚, 张建民. 邓肯-张模型和沈珠江双屈服面模型的改进[J]. 岩土力学, 2004(6): 887-890. <https://doi.org/10.16285/j.rsm.2004.06.010>
- [31] 沈广军. 基于沈珠江双屈服面模型理论的土体弹塑性模型[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2010, 37(1): 40-44.
- [32] 隋贵发, 李凤霞. 山西湿陷性的黄土特性及其地基土处理方法[J]. 山西建筑, 2004(13): 60-61.
- [33] 卢再华, 陈正汉, 方祥位, 郭剑峰, 周海清. 非饱和膨胀土的结构损伤模型及其在土坡多场耦合分析中的应用[J]. 应用数学和力学, 2006(7): 781-788.
- [34] 施斌, 姜洪涛. 粘性土的微观构造分析技术研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(6): 864-870.
- [35] 汪时机, 孙世军, 陈正汉, 彭贞, 蒋运忠, 王云亮. 造孔损伤重塑膨胀土三轴剪切试验研究[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2021, 33(3): 128-132.
- [36] 汪时机, 陈正汉, 李贤, 彭贞, 袁军. 土体孔洞损伤构造演化及其力学特性的 CT-三轴试验研究[J]. 农业工程学报, 2012, 28(7): 150-154.

- [37] Desai, C.S. and Nagaraj, B.K. (1990) Closure to “Modeling for Cyclic Normal and Shear Behavior of Interfaces” by C. S. Desai and B. K. Nagaraj (July, 1988, Vol. 114, No. 7). *Journal of Engineering Mechanics*, **116**.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(1990\)116:8\(1872.2\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(1990)116:8(1872.2))
- [38] 侯晓坤. 黄土非饱和湿陷变形特性研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2015.
- [39] 刘海松, 倪万魁, 颜斌, 王朝阳. 黄土结构强度与湿陷性的关系初探[J]. *岩土力学*, 2008, 29(3): 722-726.