

黄土微观结构性的研究综述

陈家栋, 周楚鸿, 曾嘉令, 洪志龙

西京学院, 陕西省混凝土结构安全与耐久性重点实验室, 陕西 西安

收稿日期: 2024年1月11日; 录用日期: 2024年1月30日; 发布日期: 2024年4月11日

摘要

研究了黄土的细观结构与宏观物理力学性质的变化特征, 阐释了综合结构势的微观含义。从细观定量角度解释了土样粒级势、孔隙势和连接势的变化特性, 从而引起土体宏观性质的变化。研究黄土微观结构性的影响和改变, 为土力学宏、微观的联系提供了一种新的思路, 对黄土地区的工程建设和环境保护都有着深远的意义。

关键词

黄土, 粒级势, 宏、微观结构, 孔隙势

A Review of Studies on the Microstructure of Loess

Jiadong Chen, Chuhong Zhou, Jialing Zeng, Zhilong Hong

Shaanxi Key Laboratory of Safety and Durability of Concrete Structures, Xijing University, Xi'an Shaanxi

Received: Jan. 11th, 2024; accepted: Jan. 30th, 2024; published: Apr. 11th, 2024

Abstract

In this paper, the microstructural and macrophysical and mechanical properties of loess are studied, and the microcosmic meaning of comprehensive structural potential is explained. The variation characteristics of particle size potential, pore potential and connection potential of soil samples are explained from the microscopic quantitative point of view, which leads to the variation of macroscopic properties of soil. Studying the influence and change of loess microstructure provides a new way of thinking for the relationship between macro and micro soil mechanics, and has far-reaching significance for engineering construction and environmental protection in loess areas.

Keywords

The Loess, Grain Size Potential, Macro- and Micro-Structure, Pore Potential

Copyright © 2024 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

黄土属于第四纪沉积物，它的形态、组成以及表现出的特点都有所不同，并且在西北、华北、东北等地区都有广泛的分布。黄土作为一种典型的结构性土，主要在于其孔隙比大、密度低、可溶盐含量高的特点[1] [2]。这样的结构特点使其具有较大的压缩空间，在受到特殊外力作用，例如浸水、地震或者高荷载时，就会发生塌陷或者液化，这就给实际工程建设带来了严重的阻力[3] [4] [5]。伴随着平山造城、固沟保塬和治沟造地等重大工程的建设，出现了地面沉降、边坡滑移、地基失效等灾变现象[6] [7] [8]。终其原因是对黄土特殊的结构性没有深层次的认知，没有找到这些灾变现象的根本原因或深层机理。湿陷性黄土存在较强的结构性，在常含水量情况下具有较高的强度，一般压力情况下不能摧毁它的孔隙结构，使其充分压缩。即使浸水，如果不能让其可溶盐充分的溶解，不能彻底破坏土里的盐晶胶结与架空孔隙结构，也很难让其一次性彻底的发生塌陷[9] [10]。这些现象仅依靠宏观土力学的研究理论和方法是不能够合理解释和有效解决的，必须利用细观的研究方法才能验证和说明。因此，从宏细观关联的角度研究和处理黄土地区的复杂工程建设问题是有一个有效的途径。

近些年来，国内外学者在黄土的工程性质与评价问题的关注度不够，而我国作为一个发展大国，存在严重的雾霾，酸雨的污染，包括城市垃圾，工业废水导致的土壤酸化，严重制约着我国的可持续发展道路，研究黄土的微观结构性，对工程建设和环境保护有着深远的意义。所以，对黄土细、微观结构的研究更能从本质上了解并改进它的宏观物理与力学属性。本文以破坏黄土中由碳酸钙等盐晶胶结造成的孔隙结构，从而使得黄土的结构得到重组和增强这一理论为基础，研究其细观结构特征与宏观力学性质的关联。

2. 理论

2.1. 土体微观结构研究的现状

现代土力学自形成以来取得了许多重要成果，但是，它的发展到了一个瓶颈阶段，需要依靠新的理论和方法来解决它现有的难题。微观土力学在上世纪的迅速发展，为现代土力学打破现有僵局提供了可能。如果说上世纪 80 年代以前，学者们对土体微观结构的研究还主要是定性的。那么，进入到上世纪 80 年代以后，学者们就通过各种方法来不断探索尝试定量研究土的结构特征。最为普遍的是利用微结构测试技术(SEM, CT, NMR, XDR, MIP, EDS 等)获取土的微观结构信息和图像(主要包括土颗粒大小、孔隙、形态等的定量参数)，然后利用交叉学科的知识和技术方法计算土体结构性参数。这些方法使得土微结构的定量化研究取得了一定的进展。较典型的有：Tovey [11]首次用电子显微镜对天然黏性土的结构进行了观察和研究。Brindley 等[12]通过光的衍射对黏土物进行了定量分析。Brown 等[13]与 Braja 等[14]利用 X 射线对黄土矿物和其矿物晶体结构进行了定量识别。同时，对天然湿陷性黄土和酸处理黄土的结构和力学性能进行了研究和比较，并利用扫描电子显微镜(SEM)分析了其微观结构的差异[15]。随着观测

技术的发展, Meng、Hu [16] [17]采用 SEM、能谱 X 射线(EDX)和 X 射线衍射(XRD)相结合的方法,检测了天然黄土和碱处理黄土在 4 种不同浓度下强度参数和微观结构的变化过程,分析了黄土抗剪强度指标和应力-应变特性的演化结果。Meng [18]通过颗粒分析试验,发现说明 20~50 μm 粒径对黄土的力学性质有直接影响,具有胶结作用,它能有效连接骨架大颗粒,形成颗粒团聚体,是黄土黏土矿物的有效组成。

2.2. 黄土结构性研究现状

天然黄土在沉积过程中形成了独特的大孔隙骨架结构,可溶盐和黏土物质经过长期的物理化学作用后在颗粒接触点形成了胶结物质,使不同地区的黄土都有着与其环境相适应的结构。表现为西北地区的黄土孔隙较大,颗粒物质较粗大松散,亚稳定性较明显,东南地区的黄土孔隙较小,颗粒物质较细腻紧密,稳定性较强。学者们已经意识到结构是决定黄土力学特性的本质因素,结构性指标应当同其他物理量(如粒度、湿度和密度等)一样成为黄土变形、强度等力学特征的主要参数[19]-[24]。因此,对黄土结构性研究的深入,从定性到定量,涌现出一批批研究黄土结构性的热潮。同其他类型土一样,黄土微结构研究的重点已由定性转为定量,考虑微结构作用机理的结构性模型必将成为新的研究重点。谢定义[25]曾指出,研究黄土的结构性就是要找到一个能反映黄土在外部作用条件下的结构性变化参数,将黄土结构性变化参数引入到黄土的应力应变关系中。他提出了一个既能反映土颗粒排列与联结,又简便、明细的结构性定量指标-综合结构势。胡再强[26]通过一系列室内试验,研究了非饱和黄土结构性及其影响因素,以及黄土结构特性对其力学特性的影响。在室内试验的基础上,建立了非饱和黄土的屈服函数和损伤函数,得到了非饱和原状结构性黄土的结构性数学模型。邵生俊[27]依据加荷、扰动、浸水释放土结构势的方法,由土的无侧限抗压强度定义了黄土结构性的构度。通过多个场地不同黄土的无侧限单轴压缩试验,测试分析了不同含水率原状土、重塑土和饱和原状土的单轴压缩应力-应变曲线及无侧限抗压强度变化规律,由此得出土的构度的变化规律。

2.3. 黄土综合结构势的微观含义及其表现形式

土的结构特征是指土颗粒或者土颗粒集合体的排列、组合与连接方式,以及它们之间孔隙的大小及形状特征。土的结构决定着土的各种力学性质。土结构性研究的根本任务是找到能全面反映土结构特征的量化指标,建立起宏、微观力学指标之间的直接联系。黄土的综合结构势从宏观层面反映了黄土结构性的强弱,搞清楚黄土综合结构势的微观含义并找到合适的表现形式,是将宏、微观黄土力学联系起来的一个关键科学问题。

土的结构特征具有唯一性,需要一种载体或者数学工具来反映它的这种特性。土的微观结构特征和宏观物理力学特征又存在唯一对应关系,也就是说某种环境下土的结构对应此时此刻它固有的物理力学特征,如果因为外界环境的变化(包括荷载、湿度、温度等)导致它的内部结构发生变化,那么它的物理力学特征也将随之发生改变。

3. 方法

3.1. 黄土结构性研究方法

黄土是以一种系统结构而存在的物质整体。结构要素所涵盖的各种结构参量之间存在相互关联和影响的关系。土体的天然结构又同时具有非线性、不均匀和不确定等特性。但目前的研究成果中,土体的结构参数多被赋予一种孤立、确定性的量化结果,在讨论结构参数与力学性质之间的关系时,也是基于一种结构参量与宏观力学性质之间的变化关系。土体结构的非线性、不确定性、相关联和动态特性不能

得到全面的反映,因此,无法客观准确的反映其变形和强度特征(宏观力学性质)。从演变的角度观察和研究黄土结构的复杂特征,在外力条件下的变化规律以及与宏观工程属性的定量关系。

从微观结构演化的角度分析其结构特征和宏观力学特征在湿、载作用下演变的机理,从宏微观耦合的角度诠释黄土结构势的含义。通过不同土样的颗粒分维值分析土样粒级势的强弱;通过大、中孔隙面积之比分析土样孔隙势的强弱;通过范德华力、库伦力与胶结力的微重比分析土样连接势的强弱。将不同土样的3种结构势值进行综合比较,再根据结构势值与对应宏观力学性质的变化对其强弱进行等级划分。

建立以粒级势、孔隙势和连接势为尺度的结构势三维空间,将各代表区黄土土样的结构势值投影到结构势空间,拟合结构势曲线。再通过孔隙势-力学指标的二维平面,建立黄土的结构势-力学指标的四维空间。在四维空间中寻找结构势曲线和孔隙势-力学指标曲线的最佳匹配面,建立结构势-力学指标函数模型。最后,通过原位试验验证结构势-力学指标函数模型的可靠性和准确性。

3.1.1. 粒级势的含义及其研究方法

土的粒级势表征土颗粒或者土颗粒集合体排列组合的优劣。这一性质跟土颗粒的不均匀性(级配)有直接关系,不均匀颗粒的土可以更好的压实,土颗粒排列的更紧密,均匀颗粒的土孔隙较多较大,土颗粒排列的不紧密。土颗粒的粒度分维值(Dps)可直观反映土颗粒级配的情况。级配的优劣是土样能否得到充分压缩的先决条件,所以粒级势的强弱是综合结构势强弱的基础条件。申请者拟测试不同土样的Dps和综合结构势指标,通过不同土样Dps的变化,以及黏粒、粉粒和砂粒含量的占比,研究和分析黄土综合结构势及其可变性的强弱。

3.1.2. 孔隙势的含义及其研究方法

土的孔隙势表征土颗粒或者土颗粒集合体之间孔隙的大小及优劣。黄土的孔隙主要可以分为大孔隙、架空孔隙(中孔隙)和粒间孔隙(小孔隙)。大孔隙和架空孔隙很大程度上由盐晶胶结所支撑。大孔隙和架空孔隙可以通过外力有效去除,而粒间孔隙不能通过外力让其发生明显改变。因此,大中孔隙的多少实际上反映了黄土最大压缩空间的大小,是黄土湿陷或者沉降潜力的表征。申请者欲测试不同土样的大中孔隙占比 v ,通过不同土样的 v 的变化,研究和分析黄土综合结构势及其可变性的最大值域。

3.1.3. 连接势的含义及其研究方法

土的连接势表征土颗粒或者土颗粒集合体之间连接力的大小。土颗粒连接力的大小反映了黄土抵抗压缩变形的能力,连接势实质上是黄土综合结构势中可稳性的微观表现形式。将上述三种连接力除以颗粒重力,转化为无量纲的微观结构势形式——微重比,与其他微观结构势进行统一。通过测试不同土样的范德华力、库伦力、胶结力微重比分析和研究黄土综合结构势及其可变性的强弱。

3.1.4. 三种结构式的度量

对于三种结构势的度量选择无量纲指标便于与宏观物理力学指标进行关联。根据黄土的架空结构及其宏观工程性质的特点,选择粒度分维值,大中孔隙占比及范德华力-库伦力-胶结力微重比对三种结构势进行度量。粒度分维值拥有和土的不均匀系数基本相同的含义,兼有曲率系数的意义,可客观反映土颗粒级配的优劣。架空结构(大中孔隙)是黄土产生湿陷、震陷和液化的本质原因,利用大中孔隙占比能更准确的反映黄土的孔隙性质。土的连接势中的范德华力和库伦力微重比的研究方法参考华南理工大学房营光教授团队的最新研究成果。黄土胶结力微重比的研究方法参考原状黄土与重塑黄土的无侧限抗压强度的应力差值,这一方法被业界许多学者所采用。最后,将三种微观结构势综合起来,对比宏观工程性质的强弱,评价其结构势的优劣等级。

4. 结论

在不同压力条件下,黄土的粒度分维值保持一致的规律。在同样的外界压力下,不均匀土体的细颗粒更容易填充到粗颗粒的孔隙中,从而减低孔隙率,增加土体密度。另外,粒度分维值大的土体,可以反应其细颗粒的含量也较大。我们通常认定,土的黏粒成分($r < 0.002 \text{ mm}$)粘聚力最强,粉粒($0.02 < r < 0.002 \text{ mm}$)的粘聚力较低,砂粒($r > 0.02$)基本不含有粘聚性。由此可知,土的颗粒粒径越小,也就是细颗粒物质越多,则其粘聚性越大。由以上两点可知,粒度分维值较大的土样其力学特性也较好,所以浸入 2 mol/L 硝酸溶液的黄土的力学特性最好。从粒级熵的角度分析这个现象也是一样的结果,土体结构微单元分散(表现为颗粒物质越来越多,越来越细),单元形态同向性减弱,空间方位角度的分散都会使得土体粒级熵值增加,反之,则减小。在不同压力 and 不同酸度的作用下,土体原先结构被不同程度的破坏,随着土体结构程度的降低,土体原先骨架和很多大颗粒物质被分解,从有序平衡状态向无序非平衡状态过渡,其熵值增加。如前所述,在其他情况相同的时,其熵值越大,物质越分散,混乱度越高,这样的物质就越稳定。土体小颗粒的比表面积大,它的吸附能力强,表面通常有水膜等吸附层。所以,小颗粒固相物质间常为非直接接触,颗粒间的摩擦作用小,但是粘聚力较强。而大颗粒比表面积大,颗粒间多为直接接触,所以粘聚力小,摩擦力较大。此外,颗粒间连接的强弱还与颗粒的物质成分有关,例如方解石中含有大量的碳酸钙,在漫长的成土过程中,极易形成胶结连接,从而使得成土在天然环境下具有较大的强度。

土的结构决定着土的工程性质。土的结构特征指的是土颗粒或者土颗粒集合体的排列、组合与连接方式,以及它们之间孔隙的大小及形状特征。土的结构特征一旦确定,它的密度、孔隙比、液塑限等物理特征和变形、强度、渗透性等力学特征也随之确定。而且这种对应性是唯一确定的,也就是说某种环境下土的结构对应此时此刻它固有的物理力学特征,如果因为外界环境的变化导致它的内部结构发生变化,那么它的物理力学特征,乃至化学特征也将随之发生改变。因此,借用谢定义关于黄土结构势的概念,并根据土结构性的定义将其从宏观层面细分为土的三种微观结构势概念(粒级势、孔隙势和连接势)用以反映黄土颗粒级配与孔隙特征的优劣,以及连接的强弱。根据土的结构特征和宏观物理力学指标的唯一对应关系,建立以三种结构势为尺度的结构势空间,通过孔隙势(与宏观物理力学特征关系最紧密,最便于试验测试)将土的不同力学指标引入到结构势空间,寻找并研究土的各种物理力学指标与其内部结构特征的数学函数关系,从而建立宏观土力学和微观土力学的直接联系。

参考文献

- [1] 高国瑞. 中国黄土的微结构[J]. 科学通报, 1980, 25(20): 945. <https://doi.org/10.1360/csb1980-25-20-945>
- [2] 胡瑞林, 李焯芬, 王思敬, 张礼中, 李向全. 动荷载作用下黄土强度特征及结构变化机理研究[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(2): 174-181.
- [3] 王家鼎, 袁中夏, 任权. 高速铁路地基黄土液化前后微观结构变化研究[J]. 西北大学学报, 2009, 39(3): 480-483.
- [4] 王铁行, 郝延周, 汪朝, 程磊, 李江乐. 干湿循环作用下压实黄土动强度性质试验研究[J]. 西北大学学报, 2020, 39(6): 1242-1251.
- [5] 彭建兵, 吴迪, 段钊, 唐东旗, 成玉祥, 车文越, 黄伟亮, 王启耀, 庄建琦. 典型人类工程活动诱发黄土滑坡灾害特征与致灾机理[J]. 西南交通大学学报, 2016, 51(5): 971-980.
- [6] 张继文, 于永堂, 李攀, 杜伟飞, 刘智. 黄土削崩填沟高填方地下水监测与分析[J]. 西安建筑科技大学学报, 2016, 48(4): 477-483.
- [7] 任建喜, 王丽, 王江, 王东星, 刘东洋, 刘康辉, 程远. 大断面黄土隧道双侧壁导坑法施工诱发地表沉降及隧道变形规律研究[J]. 城市轨道交通研究, 2017, 20(3): 20-24.
- [8] 张炜, 张继文, 于永堂. 第七届全国岩土工程实录交流会特邀报告——黄土高填方关键技术问题与工程实践[J]. 岩土工程技术, 2016, 30(1): 12-19.

- [9] 张茂省, 谭新平, 董英, 孙萍萍, 董鹏伟, 卢娜. 黄土高原平山造地工程环境效应浅析[J]. 地质评论, 2019, 65(6): 1409-142.
- [10] 黄雪峰, 孔洋, 李旭东, 马龙, 杨宝山. 压实黄土变形特性研究与应用[J]. 岩土力学, 2014, 35(2): 37-44.
- [11] Thom, R., Sivakumar, R., Sivakumar, V., *et al.* (2007) Pore Size Distribution of Unsaturated Compacted Kaolin: The Initial States and Final States Following Saturation. *Geotechnique*, **57**, 469-474. <https://doi.org/10.1680/geot.2007.57.5.469>
- [12] Brindley, G.W. (1980) Quantitative X-Ray Mineral Analysis of Clays. In: Brindley, G.W. and Brown, G., Eds., *Crystal Structures of Clay Minerals and Their X-Ray Identification*, Mineralogical Society of Great Britain and Ireland, London, 411-438. <https://doi.org/10.1180/mono-5.7>
- [13] Brown, G. and Brindley, G.W. (1984) X-Ray Diffraction Procedures for Clay Mineral Identification. *Mineralogical Society of London*, **41**, 305-360. <https://doi.org/10.1180/mono-5.5>
- [14] Braja, M.D. (2008) *Advanced Soil Mechanics*. Taylor & Francis, Oxford, 60-65.
- [15] Zhang, Y., *et al.* (2018) Improving the Structure and Mechanical Properties of Loess by Acid Solutions—An Experimental Study. *Engineering Geology*, **244**, 132-145. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.07.023>
- [16] Meng, J. and Li, X.A. (2019) Effects of Carbonate on the Structure and Properties of Loess and the Corresponding Mechanism: An Experimental Study of the Malan Loess, Xi'an Area, China. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, **78**, 4965-4976. <https://doi.org/10.1007/s10064-018-01457-z>
- [17] Hu, W., Liu, H. and Wang, T. (2021) Study on the Effect of Resistivity and Meso-Structure Evaluation of Alkali Solution Strengthening Loess: A Case Study. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, **643**, Article 012027. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/643/1/012027>
- [18] Meng, Z., Gang, H.W., Wei, G., *et al.* (2022) Experimental Study of the Particle Agglomeration on Its Mechanical Properties of Collapsible Loess. *Frontiers in Earth Science*, **10**, Article ID: 943383. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.943383>
- [19] 王兰民, 邓津, 黄媛. 黄土震陷性的微观结构量化分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(z1): 3025-3031.
- [20] 杨更社, 魏尧, 田俊峰, 赵轩, 叶万军. 冻融循环对结构性黄土构度指标影响研究[J]. 西安科技大学学报, 2015, 35(6): 675-681.
- [21] 钟祖良, 王睢, 刘新荣. 基于综合结构势概念的结构性原状黄土屈服准则[J]. 岩土力学, 2015, 36(11): 3041-3046.
- [22] 田堪良, 马俊, 李永红. 黄土结构性量化参数的探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(z1): 3179-3184.
- [23] 谷天峰, 王家鼎, 郭乐, 仵大磊, 李开超. 基于图像处理的 Q3 黄土的微观结构变化研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(z1): 3185-3192.
- [24] 方祥位, 欧益希, 李春海, 李捷, 申春妮. 浸湿对原状 Q 黄土微观结构与力学性质的影响研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(z2): 111-117.
- [25] 谢定义, 齐吉林. 土的结构性参数及其与变形强度的关系[J]. 水利学报, 1999, 10(3): 1-6.
- [26] 胡再强. 黄土结构性模型及黄土渠道的浸水变形试验与数值分析[D]: [博士学位论文]. 西安: 西安理工大学, 2000.
- [27] 邵生俊, 郑文, 王正泓, 王帅. 黄土的构度指标及其试验确定方法[J]. 岩土力学, 2010, 31(1): 15-19, 38.