

Analysis and Evaluation of Collapse Mechanism of Loess

Wenjing Tian

Chongqing Jiaotong University, Chongqing, 400074, China,

Abstract: Loess is widely distributed and continuous in China, and loess is distributed in a zonal pattern. It is well known for its well- development and thickness. Loess in China is distributed in Kunlun Mountains, Qinling Mountains, Taishan and so on, covering 630000 km². Because of the large area of loess landforms, from the early days of the founding of the people's Republic of China, Chinese scholars have done a lot of experiments and studies on the engineering properties and mechanism of collapsible loess, and with the development of science and technology, the study of collapsibility of loess is becoming more and more thorough and comprehensive. The study of the loess microstructure theory is the background of the study. The collapsibility of loess is analyzed from the angle of unsaturated soil mechanics, in order to provide real, powerful basis and guidance for the treatment of collapsible loess foundation in China, and put forward some suggestions and prospects for the accurate evaluation of collapsible loess in China.

Keywords: Collapsible loess; The properties of loess's structure; Collapsibility mechanism; Collapsibility evaluation

黄土湿陷机理浅析及评价

田雯婧

重庆交通大学, 重庆, 400074

摘要: 从建国初期开始, 我国学者就针对湿陷性黄土的工程性质和发生机理做了大量试验和研究, 且随着现在科学技术的发展, 对黄土湿陷性的研究越来越深入、全面, 从黄土微结构理论为背景研究黄土湿陷性到从非饱和土力学为角度分析湿陷性, 以期为我国湿陷性黄土地基处理提供真实、有力的依据和指导, 并对我国湿陷性黄土准确评价提出建议和展望。

关键词: 湿陷性黄土; 黄土结构性质; 湿陷机理; 湿陷性评价

1 引言

湿陷性黄土是一种特殊的土, 其力学性质有湿陷性、压缩性、透水性和抗剪强度, 最重要的性质是湿陷性。

黄土的空间结构体系是粗粉颗粒和细颗粒组合而成的骨架颗粒, 黄土的压缩和湿陷性就是由于骨架颗粒连接处发生断裂或错动。

有关黄土湿陷性的机理和影响因素, 研究的方向有黄土的微结构、结构强度、评价方法等。近年来, 对于黄土湿陷性的研究成果也更加全面和深入。早期的黄土湿陷研究是从黄土地质成分成因分析, 然后再以微观角度——微结构为背景, 后来, 研究开始基于数理分析方法和土力学角度。

有关黄土湿陷性的机理和影响因素, 前人针对黄土的多个方向做了大量试验研究, 尤其是黄土分布很广的中国、罗马尼亚和保加利亚等国家, 研究的方向

有黄土的微结构、结构强度、评价方法等。

近年来, 随着科技发展, 对于黄土湿陷性的研究成果也更加丰富、全面和深入。早期的黄土湿陷研究是从黄土地质成分成因分析, 然后再以微观角度——微结构为背景, 进入二十一世纪后, 黄土研究寻求自我突破, 研究开始基于数理分析方法和土力学角度, 但仍是在传统的黄土理论的框架结构内开展的。

2 湿陷性黄土研究概况

我国黄土覆盖广泛, 厚度大, 黄土作为地质土体在我国的研究开展较早, 目前已经有许多研究成果。但是由于黄土分布总面积广, 分布范围广, 又大部分具有湿陷性, 且黄土湿陷性具有随地域、气候、深度等条件变化而变化的特点, 故对黄土的深层次研究仍是十分艰巨和必要。

2.1 黄土的结构特性与湿陷性的关系

大量实验表明, 大颗粒的架空孔隙是引起极强湿陷和强湿陷的主要原因; 小颗粒之间的支架孔隙是引起中等湿陷和弱湿陷的主要原因; 不同湿陷性的黄土孔隙组成不同。宏观孔隙类型分为稳定和不稳定, 不稳定的宏观孔隙在湿陷时主要表现为破裂消失、拉长变形或成为微裂隙、宏观孔隙不稳定的原因有胶结物少, 胶结松散, 胶结物为粘土级的碎屑, 胶结不牢固。高国瑞[1]通过电镜显微图像观察, 研究了兰州黄土的微结构, 将黄土间的颗粒连接分为点接触和面胶结。点接触一般发生在刚性集粒或碎屑集粒之间, 颗粒直接接触, 接触面小, 只有极少的盐晶和粘胶微粒附在接触点处, 在水浸入时, 连接点处的盐晶溶解开始, 黄土颗粒之间的胶结作用消失, 因而在较小压力下, 比如自重压力, 颗粒间就发生破坏重组, 产生湿陷现象。而面胶结的颗粒, 接触处有较厚的黏土膜, 接触面积较大, 相对于点接触有较大强度, 在水浸入后, 在自重压力下不会发生破坏, 在较大压力作用下, 会发生湿陷作用。

非饱和黄土的结构强度[2-3]是黄土的结构在生成过程中由胶结物质连接在土颗粒间所形成的联结强度, 是结构性黏土特有的, 并且在土体结构生成时就生成, 在土体结构破坏时瓦解。在含水率低的情况下, 黄土形成了以骨架颗粒为主体骨架结构的架空形式, 从结构强度解释了黄土湿陷性的原因[4], 可分为内因和外因, 内因是组成主体结构的粗细颗粒以及它们排列而成的空隙, 黄土浸水之后, 颗粒连接处被溶解, 连接强度被削减, 在一定压力作用下失去稳定, 空隙周围的颗粒进入孔隙中, 使土体颗粒重组, 产生湿陷, 这个过程实际上就是土体结构强度减弱的过程。黄土湿陷前后的内部颗粒结构的变化可见图 1 和图 2, 的确是进入了大颗粒之间。黄土湿陷后, 小的粉状颗粒外因是荷载和水, 如若当黄土的初始含水率已趋于饱和, 即黄土颗粒重新排列的过程已经完成, 此时再有水浸入黄土结构, 黄土结构也不会产生明显破坏, 相应的湿陷现象也会减弱。由此可知, 初始含水率大, 结构强度越小, 湿陷系数越小。

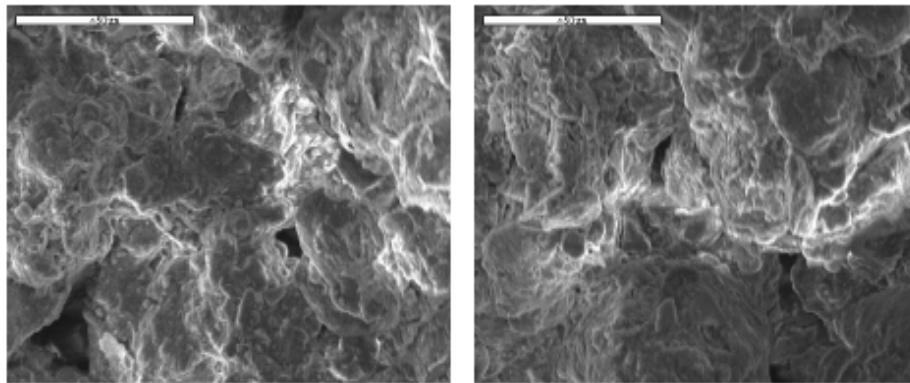


Figure 1. Electron microscope photograph of undisturbed loess sample
图 1. 原状黄土电镜扫描照片 (1000 倍)

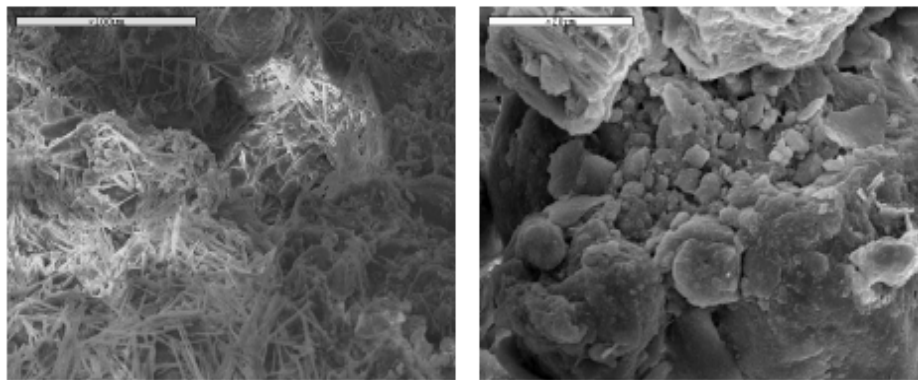


Figure 2. Electron microscope photograph of loess sample after collapsed
图 2. 湿陷后黄土电镜扫描照片 (1000 倍)

黄土的结构性不同，其性质也会受到影响。赵景波[5]等通过严格控制黄土样本的含水率和密度，将现场取回的黄土样土分别制成不同含水率的样土和相应的重塑试样，测定了土样的结构强度。结果表明，非饱和黄土的结构强度与其含水率的关系是呈反比例关系。定量地讨论了黄土的结构强度同黄土湿陷性的关系，从该定量分析研究之后表明，当黄土的含水率较大且趋于饱和，黄土的结构强度使黄土保持稳定，此时黄土的水敏性较低，湿陷性与黄土的含水率相关性不高，黄土的湿陷性弱，但这时的黄土湿陷性与其结构强度有较高的相关性，故黄土的结构强度越高，黄土的湿陷变形就越小。

基于单线法和双线法试验，确定的法国北部原状黄土的湿陷性曲线，叶为民[6]在他的研究里提出，黄土的初始含水率还密切影响着黄土的湿陷性，且含水率越大，湿陷性越不明显。井彦林[7]在控制黄土含水率，做黄土击实试验，提出了击实率的概念，即土的下沉高度和原高度比值，来表征黄土湿陷性和压实效果有相关性。

有关黄土湿陷的原因和机理，许多学者利用当代的最新科学技术应用从多种途径做了大量研究，可归纳为毛管假说、溶盐假说、胶体不足说、水膜楔入说、欠压密理论以及结构学说，所以黄土的湿陷现象不仅仅是哪一个假说能完全解释明白的，其实是复杂的物理变化和化学变化。

2.2 黄土湿陷性评价

高凌霄[8]将黄土的宏观力学结构和微结构相联系、相结合，建立黄土微结构模型，以表明黄土的宏观力学结构与微结构的关系，通过试验建立了黄土湿陷性主成分分析方法，可根据黄土主成分得分来预测黄土的湿陷性。

在现行规范中，湿陷量通过计算得到，对黄土的湿陷性评价是基本合理及可行的，然而工程应用时，实测的自重湿陷总量却与规范计算值相差大，这说明规范对于黄土湿陷量的计算还存在许多不合理的地方，例如试验荷载与路基黄土实际受力状况不符，路基水源条件不同等。倪万魁[9]等对此建立了零填挖路基黄土的降雨入渗模拟分析，用于黄土的湿陷评价，该模型主要考虑黄土地基中的竖向变形（图3）。

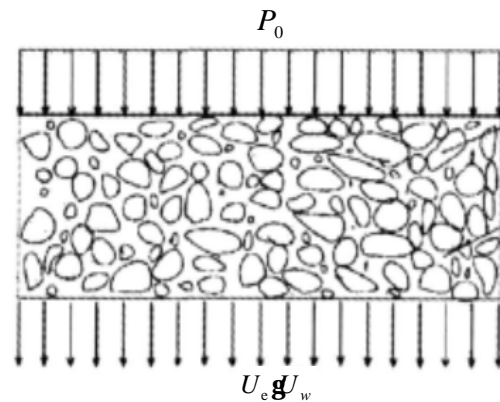


Figure 3. Loess collapsibility evaluation model
图3. 黄土湿陷性评价模型

湿陷性黄土场地实现类型可分为非自重湿陷性和自重湿陷性，具体的判定方式有：按自重湿陷量 Δz_s ，和实测自重湿陷量 Δz_s [10]。合理划分地基湿陷性等级，正确评价湿陷性黄土及其场地和地基的湿陷性，为地基施工提供合理可行的建议和指导。

就目前，黄土地基湿陷性的评价，一直是一个突出、关键的技术问题，因为评价出来的结果的正确性和合理性将直接影响整个工程的质量和安全性。虽有许多学者结合现行规范和工程实际问题就黄土的湿陷性评价从多个方面做了不少探究和创新，但是由于湿陷性黄土评价的影响因子多样化，现有的评价方法和模型都带有一定的局限性，如何正确、全面地评价黄土湿陷性仍需要更多的研究。

2.3 非饱和和土力学角度探讨黄土湿陷机理

从前对黄土的研究都是基于黄土的地质成因和微结构湿陷机制，而黄土作为典型的非饱和土，这些年来，对于黄土的研究也开始不在局限于就微结构方面的研究，而从当代饱和和土力学理论中寻求自身新发展。

基于微结构理论的湿陷机制研究不考虑湿陷黄土所处的应力状态及其湿陷过程的应力-应变特性，限制了黄土湿陷性的深入研究。

当代的非饱和和土力学把水气交界面（收缩膜）外侧与内侧应力之差一吸力，作为各种土性特征的纽带和体现土体三相变化及其作用的核心。这个吸力决定了非饱和土的应力特性、渗透特性、强度特性、变形特性和固结特性[11]。袁中夏[12]认为黄土发生湿陷的一个重要原因是，浸水后非饱和黄土吸力丧失，吸

力在维持黄土的结构强度中作用很大,吸力的大小可以用液性指数来表示,吸力与液性指数呈负相关的关系。在黄土的非饱和土土力学特性研究中,对于非饱和黄土的孔隙压力为负值,基质吸力的存在使土粒之间相互吸引相结合,组成土体的结构强度,但这个吸力在土体受到浸湿时消失,造成土体发生湿陷。

可以说非饱和土体力学为黄土研究提供的新的方向,在黄土结构里,气压力大于水压力,即孔隙水压力为负值,气压力和水压力之差产生基质吸力,基质吸力的宏观表现为表面张力。对于非饱和土体,(设定大气压为压力 0)孔隙水压力小于 0,所以基质吸力小于 0;而在饱和土体中,孔隙水压力不会存在小于 0 的情况,所以基质吸力相应地为零。这也就是饱和土体与非饱和土体的最大差异所在。

3 结论

从内因外因解释了影响黄土结构强度的因素,内因是黄土颗粒受水浸湿之后,颗粒重新排列,产生湿陷现象。

在现行规范的基础上,学者们又从多个方面提出黄土湿陷评价的方法,对丰富和完善评价规范有非比寻常的意义,使黄土湿陷评价更具有理论意义和工程实用价值。

随着研究的不断深入,对黄土湿陷机理的研究越来越全面,从黄土作为典型的非饱和土体为出发点,以非饱和土力学为理论,对黄土为何发生湿陷这一全新的出发点来开展研究,对于黄土研究来说,取得了重大突破和发展,为黄土的进一步研究提供了新方向和新途径。

References (参考文献)

- [1] Gao G.R. Structural theory of collapsible deformation of Loess. *Journal of Geotechnical Engineering*. 1990, 1.
高国瑞.黄土湿陷变形的结构理论.岩土工程学报. 1990, 1.
- [2] Dang J.Q., Li J. The structural strength and shear strength of unsaturated loess. *Journal of Hydraulic Engineering*. 2001, 7, 79-83.
党进谦,李靖.非饱和黄土的结构强度与抗剪强度.岩土力学-水利学报. 2001, 7, 79-83.
- [3] Dang J.Q. Structural strength of unsaturated loess and its effect. *Journal of Northwest Agricultural University*. 1998, 26, 48-51.
党进谦.非饱和黄土的结构强度及其作用.西北农业大学学报. 1998, 26, 48-51.
- [4] Liu H.S., Ni W.K., Yan B., Wang C.Y. Preliminary study on the relationship between structural strength and collapsibility of loess. *Geotechnical Mechanics*. 2008, 29.
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.岩土力学. 2008, 29.
- [5] Zhao J.B., Chen Y. Study on void and collapsibility of Loess. *Journal of Engineering Geology*. 1994, 29, 722-726.
赵景波,陈云.黄土的空隙与湿陷性研究.工程地质学报. 1994, 29, 722-726.
- [6] Ye W.M., Cui Y.J., Huang Y. Collapsibility of loess and its evaluation criteria. *Journal of Geomechanics and Engineering*. 2006, 25, 550-556.
叶为民,崔玉军,黄雨.黄土的湿陷性及其评价准则.岩土力学和工程学报. 2006, 25, 550-556.
- [7] Jing Y.L., Ni Y.Q., Lin D.J., Hu Z.P., Li X.G., Zhang Z.Q. Study on the relationship between collapsibility of loess and compaction test index.
井彦林,仵彦卿,林杜军,胡志平,李晓光,张志权.黄土的湿陷性与击实试验指标关系研究.
- [8] Gao L.X., Luan M.T., Yang Q. Evaluation of collapsibility of loess based on principal components of micro-structural parameters. *Geotechnical Mechanics*. 2012, 33, 1921-1926.
高凌霞,栾茂田,杨庆.基于微结构参数主成分的黄土湿陷性评价.岩土力学. 2012, 33, 1921-1926.
- [9] Ni W.K., Yan B., Liu H.S. Evaluation of collapsibility of highway subgrade loess. *Journal of Engineering Geology*. 2007, 15, 513-520.
倪万魁,颜斌,刘海松.公路路基黄土湿陷性评价问题.工程地质学报. 2007, 15, 513-520.
- [10] Luo Y.S. Evaluation of collapsible loess foundation. *Journal of Geotechnical Engineering*. 1998, 20, 87-91.
罗玉生.湿陷性黄土地基评价.岩土工程学报. 1998, 20, 87-91.
- [11] Fredlund D.G., Rahardjo H. Soil mechanics of unsaturated soils. Chen Z.Y., Zhang Z.M., et al. Beijing: China Construction Industry Press. 1997.
Fredlund D.G., Rahardjo H.非饱和土土力学(中译本).陈仲颐,张在明,等译.北京:中国建筑工业出版社. 1997.
- [12] Yuan Z.X., Wang L.M., Wang J. Comments on collapsibility of loess considering unsaturated soil and structural characteristics. *Northwest Seismological Journal*. 2007, 29, 12-17.
袁中夏,王兰民,王峻.考虑非饱和土与结构特征的黄土湿陷性评论.西北地震学报. 2007, 29, 12-17.