

文章编号: 1000-7598-(2008) 03-0722-05

黄土结构强度与湿陷性的关系初探

刘海松^{1,2}, 倪万魁¹, 颜 斌¹, 王朝阳³

(1. 长安大学 地质工程与测绘工程学院, 西安 710054; 2. 九江学院 土木与城建学院, 九江 332005;
3. 成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 成都 610059)

摘 要: 阐述了黄土结构强度的概念和测定方法及其变化规律, 并依据其与含水率的幂函数关系以及黄土湿陷系数与含水率的幂函数关系, 找到了结构强度与湿陷系数的线性拟合关系, 对黄土结构强度与湿陷性的关系进行了分析。结果表明, 黄土的初始含水率越大, 结构强度越小, 湿陷系数也越小; 在含水率相同或相近的情况下, 黄土的湿陷系数会随着结构强度的增大而减小。

关 键 词: 黄土; 结构强度; 含水率; 湿陷系数
中图分类号: TU 441 **文献标识码:** A

Discussion on relationship between structural strength and collapsibility of loess

LIU Hai-song^{1,2}, NI Wan-kui¹, YAN Bin¹, WANG Zhao-yang³

(1. College of Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 2. College of Engineering and Urban Construction, Jiujiang University, Jiujiang 332005, China; 3. State Key Laboratory of Geological Hazards Prevention and Geological Environment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: The concepts, testing measures and changing rules about the structural strength of loess are described respectively. According to the relationship of power function between structural strength of loess and water content, as well as the collapsibility coefficient and water content, a linearly fitting formula between structural strength and collapsibility coefficient is found out. Furthermore, the impacts of structural strength on the collapsibility coefficient of loess are analyzed. The results show that the value of structural strength and collapsibility coefficient will be smaller when the value of initial water content is bigger. But when the initial water content is same or near, the collapsibility of loess will diminish with the structural strength increasing.

Key words: loess; structural strength; water content; collapsibility coefficient

1 引 言

针对黄土的湿陷原因和机制问题, 从 20 世纪 30 年代发现黄土的湿陷性以来, 研究人力图通过各种途径, 包括最新技术的应用, 来探求这个问题, 并建立了许多学说。

近年来, 原状非饱和黄土的结构性及其力学性质的研究更是引起了人们的广泛关注。研究表明: 各地土的结构性存在较大差异, 对其力学性质的影响不同。然而, 针对黄土的湿陷性与黄土结构性关系的研究, 定性的多而定量的成果很少。通过研究黄土结构强度, 定量地探讨了黄土的结构强度与黄土湿陷性的关系, 并得到一定的结论, 这是黄土湿

陷机制研究的一种新尝试, 同时对指导工程勘察及工程实践具有现实意义。

2 结构强度的形成与概念

非饱和黄土的结构强度^[1, 2]是土结构在生成过程中由胶结物质所形成的联结强度, 是结构性黏土特有的, 伴随土体结构的生成而生成, 随土体结构的破坏而消失。在干旱、半干旱条件下, 黄土形成了以粗粉粒为主体骨架的架空结构, 在粗粉粒间接点处的微小颗粒、腐殖质胶体及可溶盐等一起形成了胶结性的联结, 该联结强度即为非饱和黄土的结构强度。

当非饱和黄土的天然结构在外力作用下发生破

收稿日期: 2006-08-04

基金项目: 自然科学基金资助项目 (No. 40471023); 西部交通科技项目 (No. 2001 318 36115)。

作者简介: 刘海松, 男, 1971 年生, 博士研究生, 主要从事地质工程专业教学工作以及黄土公路路基、边坡方面的研究。E-mail: lhsong@163.com

坏时,胶结物质形成的联结强度逐渐丧失,但其在正常压密情况下的强度(包括颗粒间的分子引力和摩擦力)不变。因此,非饱和黄土的结构强度应定义为粗粉粒间接点处的胶结物质产生的联结强度,其大小为非饱和黄土的天然结构破坏时所丧失的强度,即非饱和黄土结构强度 q_s 的大小可用其天然结构破坏时原状黄土与相应的(同重度、同含水率)重塑黄土的剪应力差 τ_s 表示。

3 结构强度的测定

为了测定土样的结构强度,严格控制土样的含水率与密度,将现场取回的原状土样分别制成不同初始含水率的原状试样和相应的(同含水率,同密度)重塑试样。

试验采用DJY-4型四联等应变直剪仪,采用快剪法,剪切历时3~5 min。剪切速率为6 rad/min,垂向压力分别为50, 100, 200, 300 kPa。试样在各级压力下的抗剪强度取峰值强度或剪应力-剪切位移曲线上变形量为4 mm时所对应的应力,分别测定每一初始含水率的原状试样与相应的重塑试样的剪应力-剪切位移曲线(见图1~3),用摩尔-库仑定律整理试验资料(见表1)。

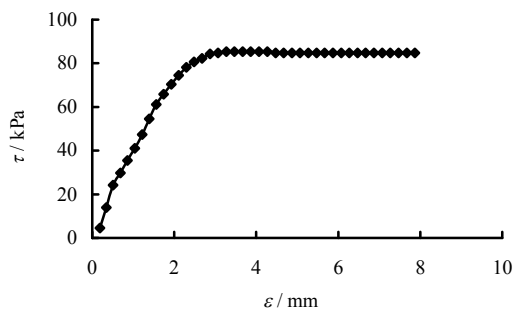


图1 原状黄土剪应力 τ -剪切位移 ϵ 关系曲线
Fig.1 Shear stress-shear stress-displacement curve of undisturbed loess

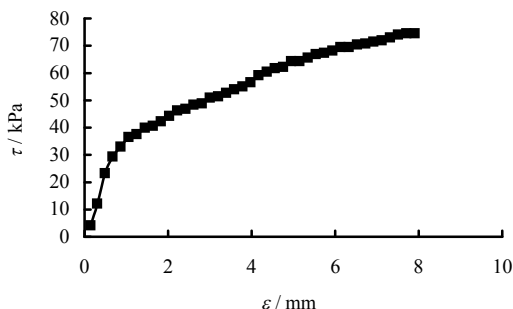


图2 重塑黄土剪应力 τ -剪切位移 ϵ 关系曲线
Fig.2 Shear stress-shear stress-displacement curve of loess by recasting

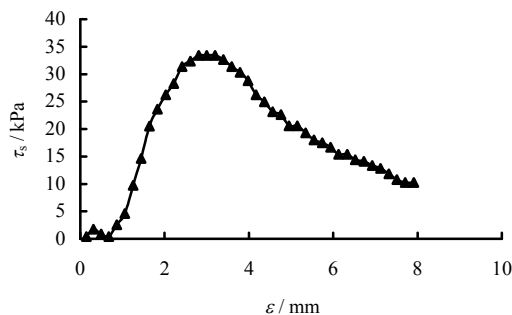


图3 原状黄土与重塑黄土应力差 τ_s -位移 ϵ 曲线
Fig.3 Stress difference-displacement curve between undisturbed loess and loess by recasting

表1 Q_3 黄土直剪试验结果
Table 1 The results of direct shear test on Q_3 loess

w /%	ρ_d / $g \cdot cm^{-3}$	原状试样		重塑试样		q_s /kPa
		c / kPa	φ / (°)	c / kPa	φ / (°)	
15.8	1.52	52.6	16.6	33.6	19.1	35
17.7	1.51	37.8	16.3	22.9	18.7	25
19.8	1.50	28.9	15.8	21.2	18.4	14
21.7	1.49	21.8	15.5	19.5	17.8	8
23.8	1.51	17.0	15.5	11.3	17.5	4

4 非饱和黄土结构强度的变化规律

4.1 结构强度的发挥规律

原状黄土的剪应力-剪切位移曲线有一明显的转折点(图1),重塑黄土由于结构强度被破坏,其剪应力-剪切位移曲线与原状黄土的相比明显不同,表现出应变硬化型(图2)。原状黄土和重塑黄土的剪应力-剪切位移曲线在转折点之前,曲线较陡,应力与位移基本上呈线性关系,不同的只是转折点的剪应力和剪切位移不同^[3]。

图3是原状黄土与相应的重塑黄土的应力差随剪切位移的变化曲线,即非饱和土的结构变化曲线,反映了土的结构特性在应力-应变关系中的发挥和消失过程。结构特性的变化曲线可以分为两段,分界点与原状黄土剪应力-剪切位移曲线的转折点相对应。在分界点之前,应力差随着应变量的增大而急剧增大,表明非饱和黄土的结构强度迅速发挥作用,到达分界点处时达到极大值。在分界点之后,应力差随着剪切位移量的增大而逐渐降低,表明非饱和黄土的天然结构逐渐破坏,结构特性逐渐丧失。可以说,土的结构特性变化曲线的分界点是非饱和黄土的天然结构发生破坏的起点。取这一分界点处所对应的应力差为非饱和黄土的结构强度。

4.2 结构强度的变化规律

试验所得不同初始含水率下的 Q_3 黄土的结构

强度 q_s 、含水率 w 以及湿陷性系数 δ_s 见表 2。将实测结构强度与对应初始含水率点绘于直角坐标系中 (图 4), 可见非饱和黄土的结构强度随含水率的增大而逐渐降低, 在低含水率下的降低幅度远大于在高含水率下的降低幅度。如初始含水率为 15.8 % 的黄土, 当含水率增加 12.0 % 而达到 17.7 % 时, 其结构强度降低 10 kPa; 而初始含水率为 19.8 % 的黄土, 当含水率增加 20.0 % 达到 23.8 % 时, 其结构强度才降低 10 kPa 左右。这与黄土的强度在低含水率下受水分影响强烈而高含水率下受水分影响小的规律相一致; 在低含水率下, 非饱和黄土中的水分在土体内的分布很不均匀, 绝大多数水分赋存于细小颗粒的孔隙中。文献[4]研究表明: 当非饱和黄土的总含水率变化 1 % 时, 细小颗粒的孔隙中的含水率有 5 % 左右的变化, 因此, 在低含水率下, 含水率的微小变化对结构强度有着相当大的影响^[5]。原因可归属于水对胶结物的影响, 黄土具有以粗粉粒为主体骨架的架空结构, 粗粉粒间接点处的可溶盐在黄土结构中起着半骨架半胶结的作用, 加强了接点处的联结强度。但粗粉粒间接点处的可溶盐处于特殊的微晶体状态, 且具有吸附作用^[6], 因此, 黄土的结构对水很敏感, 当含水率增大时, 可溶盐逐渐溶解, 使胶结物质产生松弛作用, 削弱了胶结物的联结能力, 引起结构强度的降低。

表 2 Q₃ 黄土的强度参数表
Table 2 The strength parameter of Q₃ loess

w / %	ρ_d / g · cm ⁻³	q_s / kPa	c / kPa	δ_s
15.8	1.52	35	52.6	0.063 0
17.7	1.51	25	37.8	0.052 4
19.8	1.50	14	28.9	0.047 0
21.7	1.49	8	21.8	0.031 4
23.8	1.51	4	17.0	0.014 9

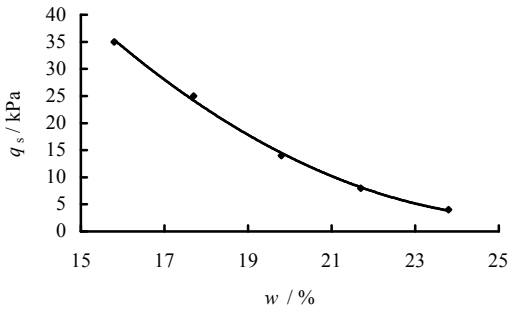


图 4 Q₃ 黄土结构强度 q_s 与含水率 w 的关系曲线
Fig. 4 Relationship between structural strength q_s of Q₃ loess and water content w curve

由图 4 可知, 非饱和黄土的结构强度与含水率之间呈幂函数关系, 可描述为

$$q_s = Aw^\lambda \tag{1}$$

式中: q_s 为非饱和黄土的结构强度 (kPa); w 为初始含水率 (%), A 和 λ 均为由土的性质所决定的参数。

回归分析得到试验所用非饱和 Q₃ 黄土的参数 $A = 9 \times 10^7$, $\lambda = -5.310 7$, 相关系数 $R = 0.987 2$ 。

而含水率 w 与湿陷系数 δ_s 也呈幂函数拟合关系 (图 5), 表达式为

$$\delta_s = 583.41 w^{-3.247 8} \tag{2}$$

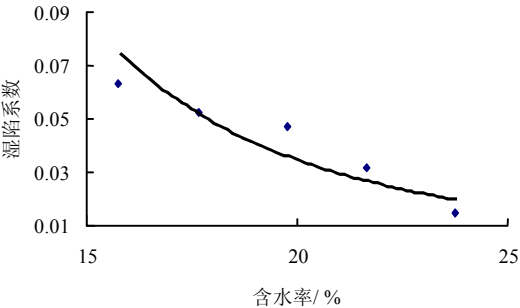


图 5 对应结构强度的含水率与湿陷系数的关系曲线
Fig.5 Relationship between water content matching structural strength and collapsibility coefficient curve

5 从结构强度分析黄土湿陷原因

湿陷是黄土在外部荷载作用下, 当水浸入土体时所产生的一种特殊变形, 因此, 黄土的湿陷原因可以归结为内因和外因两种, 内因是黄土的组成结构, 外因是荷载和水。

首先, 从内因分析, 组成黄土的颗粒骨架为单个的粉粒及由碎屑颗粒黏结成的集粒、骨架颗粒之间的大孔隙及中孔隙、土颗粒之间的非抗水性联结 (包括分子引力、由薄膜水和毛细管水产生的吸力、由可溶于水的盐类结合、黏粒结合的胶结以及由水引起胶体化学变化的胶体胶结)^[7]。在西安一禹门口高速公路富平试验路段取样, 进行了原状黄土以及浸水湿陷后黄土的电镜扫描 (图 6、图 7) 研究, 分析可知, 土样浸水后, 土体架空的以点接触处为主的矿物碎屑颗粒或集粒黏结物被软化、溶解, 同时, 颗粒之间连接也被软化、破坏, 使土颗粒连接的总强度减弱, 黄土颗粒分散; 颗粒表面的矿物质成分由于水的作用, 溶解或滑落到土体中的大、中孔隙内, 使土体结构崩溃, 形成湿陷。此过程实质是土体结构强度降低的过程。

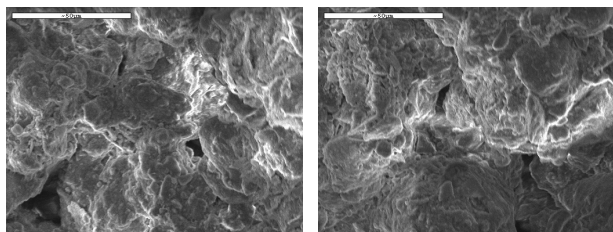


图6 原状黄土电镜扫描照片(1 000 倍)

Fig.6 Electron microscope photograph of undisturbed loess sample

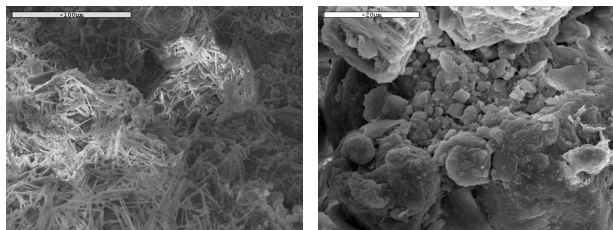


图7 湿陷后黄土电镜扫描照片(1 000 倍)

Fig.7 Electron microscope photograph of loess sample after collapsed

再由外因上看,当初始含水率达到或接近饱和含水率情况下,黄土颗粒含量变化随时间的增加已趋于稳定^[8],土体孔隙的减少也已完成,土体颗粒以及各种胶结的破坏早已完成,其对应的结构强度很小;此时黄土的结构对水的敏感程度就会降低,黄土的湿陷随含水率的变化程度很小。

由结构强度变化规律的定量分析也可以得知,当黄土饱和、其有效强度稳定后,结构强度开始发挥主要作用。研究表明,随着含水率的增大,结构强度逐渐减小,黄土的湿陷性也相应减弱。

可见,结构强度是黄土湿陷的非常直接的影响因素,初始含水率越大,结构强度越小,湿陷系数也越小。

6 结构强度与黄土湿陷性的关系

既然结构强度是黄土湿陷的重要原因,那么结构强度与湿陷性必然存在内在的联系。对于相同地区、含水率相近的情况,黄土的结构强度又有所不同,此时结构强度与湿陷性的关系又如何呢?

在西安一禹门口高速公路富平试验路段,按不同深度取样,进行了相同或相近初始含水率下的结构强度以及湿陷性试验研究(表3)发现,不同深度的黄土,尽管在含水率相同或相近的情况下,结构强度也有所不同,湿陷系数差别也很大,二者之间是一种线性递减的关系(图8),表达式可以近似为

$$\delta_s = 0.1499 - 0.0044q_s \quad (3)$$

表3 Q₃黄土相近含水率时的结构强度与湿陷系数
Table 3 Structural strength and collapsibility coefficient with the same water content of Q₃ loess

参数	w / %									
	15.2	14.9	15.1	14.8	15.3	15.9	14.9	15.2	15.4	15.3
q_s / kPa	25.9	26.4	22.4	19.9	32.0	23.0	22.0	29.7	30.0	31.0
δ_s	0.051	0.034	0.043	0.067	0.011	0.038	0.059	0.017	0.018	0.012

由图8容易看出,当初始含水率相同或相近时,黄土的湿陷系数会随着结构强度的增大而减小。其原因是含水率相同时,黄土的初始结构形式以及孔隙和胶结物质等一系列变化都很相似。这种状态下,结构强度对浸水后土体颗粒含量变化、结构破坏以及孔隙的填充等将发挥最大的作用,结构强度越大,土体颗粒的连接以及胶结强度等也大,水对黄土结构的影响就越小,遇水后的湿陷变形必然越小。

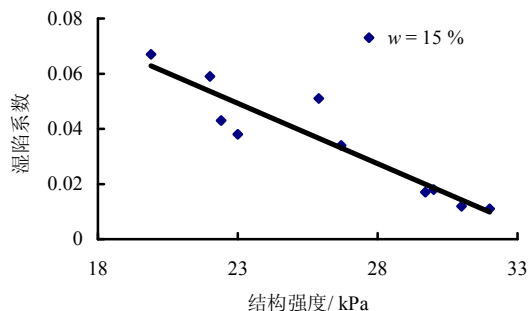


图8 结构强度与湿陷系数的关系曲线
Fig.8 Relationship between structural strength and collapsibility coefficient curve

7 结 语

通过大量研究资料分析了黄土的结构强度与湿陷性的关系,将非饱和黄土的结构强度研究与黄土湿陷性结合起来,提出了“黄土结构强度是黄土湿陷非常直接的影响因素,初始含水率越大,结构强度越小,湿陷系数也越小”以及“在含水率相同或相近的情况下,黄土的湿陷系数会随着结构强度的增大而减小”两个重要结论。

但是气候条件、颗粒组成、微结构、化学成分以及结构强度等因素综合作用、互相影响,才形成了黄土湿陷变形错综复杂的物理化学过程。因此,本文所提出的黄土结构强度与湿陷性的定量关系,只是作为黄土湿陷机制研究的新尝试,尚需进行大量的试验和分析,以期得到更加完善的结论。

参 考 文 献

- [1] 党进谦,李靖. 非饱和黄土的结构强度与抗剪强度[J].

- 水利学报, 2001, (7): 79—83.
- DANG Jin-qian, LI Jing. The structural strength and shear strength of unsaturated loess[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2001, (7): 79—83.
- [2] 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.
- DANG Jin-qian. The construction strength of unsaturated loess and its use[J]. **The Journal of Northwest Agricultural University**, 1998, 26(5): 48—51.
- [3] 缪林昌, 殷宗泽. 非饱和土的剪切强度[J]. 岩土力学, 1999, 20(3): 1—6.
- MIAO Lin-chang, YIN Zong-ze. The shear strength for unsaturated soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 1999, 20(3): 1—6.
- [4] 林崇义. 黄土的结构特性[M]. 北京: 科学出版社, 1961: 1—10.
- [5] 党进谦, 郝月清. 含水率对黄土结构强度的影响[J]. 西北水资源与水工程, 1998, 9(2): 15—19.
- DANG Jin-qian, HAO Yue-qing. Effect of water content on the structure strength of loess[J]. **Northwest Water Resources & Water Engineering**, 1998, 9(2): 15—19.
- [6] 张炜, 张苏民. 非饱和黄土的结构强度特性[J]. 水文地质工程地质, 1990, (4): 22—25.
- ZHANG Wei, ZHANG Su-min. The characteristics of structural strength of non-saturated loess[J]. **Hydrogeology and Engineering Geology**, 1990, (4): 22—25.
- [7] 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.
- HU Zai-qiang, SHEN Zhu-jiang, XIE Ding-yi. Micro structure and inundation of unsaturated loess[J]. **Journal of Nanjing Hydraulic Research Institute**, 2000, (2): 68—71.
- [8] 黄义, 张引科. 非饱和土土-水特征曲线和结构强度理论[J]. 岩土力学, 2002, 23(3): 268—277.
- HUANG Yi, ZHANG Yin-ke. The theory of soil-water characteristic curve and structure strength for unsaturated soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2002, 23(3): 268—277.

第 25 届全国土工测试学术研讨会

(2008 年 10 月 24~26 日, 杭州)

主办单位: 中国土木工程学会土力学及岩土工程分会土工测试专业委员会; 中国水利学会岩土力学专业委员会土工测试专门委员会; 中国水利学会岩土力学专业委员会土工离心机分委员会; 中国土工合成材料学会土工合成材料与环境土工专业委员会

承办单位: 浙江大学; 软弱土与环境土工教育部重点实验室

协办单位: 浙江工业大学; 浙江理工大学; 浙江科技学院; 浙江省土木建筑学会工程测试分析学术委员会

重要日期: 2008 年 4 月 30 日前提交论文; 2008 年 5 月 30 日前将返回论文录用通知; 2008 年 6 月 30 日前提交修改后的论文。

邀请辞: 土工测试技术是岩土工程科学技术进步的基石, 是提高岩土工程科研、设计和施工建设水平的重要手段。近年来国内岩土工程界对土工测试的重视程度与日俱增, 各科研单位和高校先后引进或研制了一批先进的土工测试设备, 并在测试技术和成果方面取得了可喜的发展。为促进相互交流学习, 将于 2008 年 10 月在杭州举办第 25 届全国土工测试学术研讨会。本次研讨会是主要围绕“微观观、单元体、模型试验、现场测试”4 个尺度的土工测试技术、设备及成果开展广泛的学术交流和讨论。会议期间将邀请国内外著名的土工测试专家作 2008 年度曾国熙讲座。会议同时将举办土工测试新设备和新技术展览会并组织参观活动。欢迎全国(包括港澳台地区)各界从事土工测试的技术人员、研究生踊跃投稿并参加会议。

会议专题: (1) 实验土力学; (2) 土体微观观测试; (3) 单元体土工试验; (4) 物理模型试验(含土工离心模拟试验); (5) 土工合成材料测试; (6) 环境土工测试; (7) 土工原位测试; (8) 土工构筑物健康监测及预警预报。

论文要求: 本次学术论文要求尚未在其他公开出版物上发表, 论文集将正式出版发行。论文版面费: 论文篇幅限制在 5 页内(含图表约 5 000 字), 5 页内, 每页 100 元, 超过 5 页后, 每页 200 元。详情请登陆会议网站: www.ccea.zju.edu.cn/meeting。

日程安排: 10 月 24 日全天注册报到; 10 月 25 日上午开幕式特邀报告, 下午专题报告; 10 月 26 日上午水平报告, 下午自由报告。

联系人: 詹良通博士

联系地址: 浙江大学建筑工程学院岩土工程研究所 浙江省杭州市浙大路 38 号 邮编: 310027

电话: 0571-87952415 或 13777493386 传真: 0571-87952269 E-mail: zhanlt@zju.edu.cn

