

兰州马兰黄土的水敏感性特征

李保雄^{1,2}, 牛永红³, 苗天德¹

(1. 兰州大学土木工程与力学学院, 甘肃 兰州 730000; 2. 甘肃省科学院地质自然灾害防治研究所, 甘肃 兰州 730000;

3. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 马兰黄土在水软化作用下, 土体的物理、力学与水理性质呈现出明显的规律性, 属典型的水敏感性地质体。通过多断面勘测, 采用不同的原位及室内试验方法, 分别在荷兰尤怀特大学和甘肃兰州对兰州地区马兰黄土的工程地质性质进行了系统测试。在大量试验资料的基础上, 对兰州马兰黄土的水敏感性特征进行了多方法研究, 根据试验室和原位测试结果, 论述了兰州马兰黄土水理性质和抗剪强度的变化规律, 划分了兰州马兰黄土类脆性变形和类塑性变形的界限, 提出了兰州马兰黄土的多项临界指标参数。

关键词: 马兰黄土; 试验; 水理性质; 界限含水率; 水敏感性; 抗剪强度; 特征

中图分类号: P642.13; P694 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2007)02-0294-05

作者简介: 李保雄(1962-), 男, 陕西武功人, 博士, 研究员, 主要从事地质灾害防治与岩土力学研究工作。E-mail: LBX0325@163.com。

Water sensitivity of Malan loess in Lanzhou

LI Bao-xiong^{1,2}, NIU Yong-hong³, MIAO Tian-de¹

(1. College of Civil Engineering and Mechanics, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 2. Geological Hazards Institute, Gansu

Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 3. Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese

Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Malan loess was a special water sensitive geological deposit, whose physical, mechanical and hydraulic properties changed obviously under the softening action of water. Based on the investigation, in-situ and Lab tests on Malan loess carried out in Utrecht University of Netherlands and Lanzhou of Gansu Province with different methods, the water sensitivity, the hydraulic and shear strength properties of Malan loess were studied. The boundary of the brittle and plastic deformations was found, and some important critical indices of Malan loess were developed.

Key words: Malan loess; test; hydraulic property; critical moisture content; water sensitivity; shear strength; characteristic

0 引言

我国西北地区黄土沉积巨厚, 滑坡、泥石流等地质自然灾害频发, 是全国乃至全世界地质灾害和水土流失最严重的地区之一^[1]。黄土水敏感性强, 在水的作用下土体力学强度大幅度下降是诱发黄土滑坡的重要因素。随着国家西部大开发步伐的加快, 黄土高原地区将成为人口和经济的高度发展区。马兰黄土是我国西北地区经济建设和生产、生活的主要载体, 研究马兰黄土的水敏感性特征具有重要意义。

甘肃省兰州地区黄土最大沉积厚度逾 300 m, 马兰黄土厚度逾 30 m, 地层层序齐全, 综合反映了黄土高原的环境变化特征^[2], 具有较高的科学研究价值。刘东生、张宗祜、王永焱等先后对兰州黄土的沉积环境进行了大量研究^[3]。近年来, 高国瑞、雷祥义、孙广忠等对黄土的物理力学性质进行了深入研究, 提高

了我国黄土研究的整体水平。Derbyshire、E Burbank等对我国黄土高原沉积环境的研究成果, 推动了黄土学的发展。本文在马兰黄土水理、力学性质试验室和原位测试的基础上, 重点研究了兰州马兰黄土的水敏感性特征^[4]。

1 试验样品采集与试验过程

兰州北部地貌类型主要为卵状黄土丘陵, 南部地貌类型主要为黄土塬梁。兰州马兰黄土为干燥环境下的风力沉积物, 地质年代介于 $0.9 \times 10^4 \sim 9.8 \times 10^4$ a 之间, 最大沉积厚度 32.50 m。兰州地区黄土地层层序齐全, 是世界上黄土沉积厚度最大的地区(兰州西津

基金项目: 中国国家科委攻关项目(CII-CT92-0004); 甘肃省科学基金资助项目(2003506)

收稿日期: 2005-12-16

村黄土沉积厚度达 409.93 m,) 具有典型的代表性。兰州市区南部皋兰山黄土厚度 298 m, 市区北部九州台黄土厚度 335 m, 市区西部大湾黄土厚度 269.30 m。笔者在中国—欧共体国际合作项目与甘肃省科学基金项目执行期间, 分别对以上 3 处黄土剖面进行了勘测, 全断面采集不同时代的黄土原状样品, 先后在兰州、英国莱斯特(Leicester)、荷兰尤怀特(Utrecht)等地对兰州马兰黄土的物理、力学与水理性质进行了全指标测试, 重点研究了马兰黄土的物理、力学及水理性质及其水敏感性特征^[5]。

2 马兰黄土的物理特性

兰州马兰黄土孔隙和垂直节理发育, 粒组成分较粗, 细粒土含量较高, 以粉土为主, 含多种易溶盐, 土体各向异性明显, 水敏感性强, 是典型的风积黄土。

2.1 马兰黄土的孔隙性

兰州马兰黄土的孔隙比一般大于 1.00, 孔隙率大于 55%, 试验结果表明, 马兰黄土的孔隙比可达 1.20。如图 1 所示, 随着埋藏深度的增加, 马兰黄土的孔隙比与孔隙率逐渐减小。根据试验结果, 经统计、分析, 将兰州马兰黄土的孔隙比可表示为

$$e = 1.20 - 0.0085D \quad , \quad (1)$$

式中, e 为马兰黄土的孔隙比, D 为土体埋藏深度。

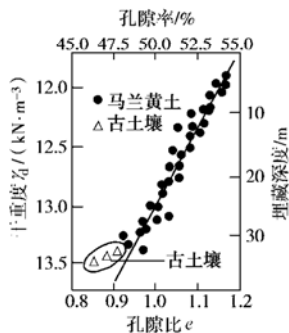


图 1 兰州马兰黄土孔隙比与孔隙率随深度变化曲线

Fig. 1 Variation of porosity and void ratio of Malan loess with depth

2.2 天然含水率

兰州地处干旱—半干旱地区, 气候干旱, 位于地表的马兰黄土含水率较低。当马兰黄土沉积年代小于 5×10^4 a, 或埋藏深度小于 10 m 时, 土体含水率一般小于 10%。如式 (2) 所示, 马兰黄土含水率主要受大气降水、沉积年代和埋藏深度等因素的影响:

$$w = 1.25 \ln D + 1.15 \ln Y + 0.85 \ln P + 1.50 \quad , \quad (2)$$

式中, w 为马兰黄土天然含水率 (%), D 为土体埋藏深度 (m), Y 为马兰黄土沉积年代 (10^4 a), P 为区域多年平均降水量 (mm)。

随着埋藏深度的增加, 马兰黄土含水率呈规律性

增加 (图 2), 表层黄土处于干燥状态, 含水率一般低于 5.0%, 中部土体含水率介于 5.0%~10.0%, 受古土壤相对滞水作用的影响, 位于底部的黄土含水率较高。

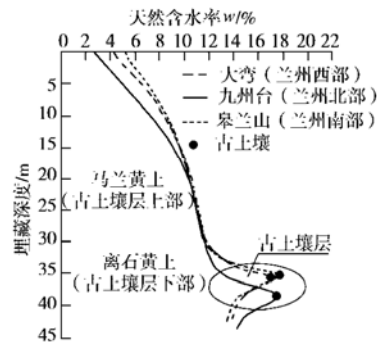


图 2 兰州马兰黄土天然含水率随埋藏深度变化曲线

Fig. 2 Relationship of moisture content with depth of Malan loess

2.3 重度

重度是影响马兰黄土抗剪强度、湿陷性等特征的重要指标参数, 如图 3 所示, 兰州马兰黄土干重度介于 $11.50 \sim 14.00 \text{ kN/m}^3$, 平均值 12.50 kN/m^3 ; 天然重度介于 $12.50 \sim 16.00 \text{ kN/m}^3$, 平均值 13.50 kN/m^3 。根据试验结果统计分析, 将兰州地区马兰黄土的天然重度与干重度分别表示为

$$r = 13.50 + 0.08H \quad , \quad (3)$$

$$r_d = 12.50 + 0.06H \quad , \quad (4)$$

式中, γ , γ_d 分别为马兰黄土天然重度与干重度 (kN/m^3), H 为土体埋藏深度 (m)。

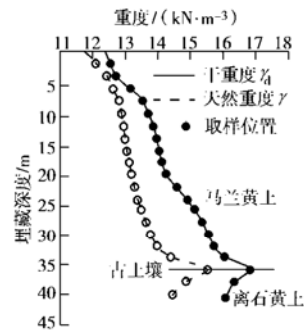


图 3 兰州马兰黄土重度随埋藏深度变化曲线

Fig. 3 Relationship of bulk density with depth of Malan loess

2.4 粒组成分

根据颗粒分析与电子显微观察结果, 兰州马兰黄土具有大孔隙结构, 孔隙中充填有空气、水和黏土颗粒^[6]。如表 1 和图 4 所示, 兰州马兰黄土中粉土含量大于 60%, 粉细砂含量小于 10%, 黏粒含量介于 10%~20%。

表 1 兰州马兰黄土的粒组成分

Table 1 Grain size compositon of Malan loess in Lanzhou				
粒组	粉细砂	粗粒粉土	细粒粉土	黏粒
颗粒直径/ μm	>50	10~50	5~10	<5
含量/%	13.3	61.5	17.6	7.6

注: 表中数据为试验平均值。

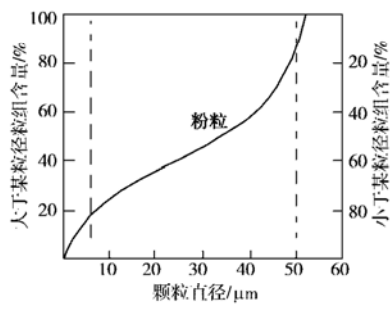


图 4 兰州马兰黄土的粒组成分

Fig. 4 Grain size composition curves of Malan loess

3 马兰黄土的水理性质

马兰黄土水敏感性强,在水软化作用下结构破坏,发生大面积湿陷,强度大幅度下降。马兰黄土的水理性质主要包括土体的塑性、渗透性和湿陷性等^[7]。

3.1 马兰黄土的塑性

根据试验结果统计分析,兰州马兰黄土的塑限为 $(18.0\pm1.6)\%$,液限为 $(24.5\pm2.6)\%$,土体一般处于硬塑状态—固态。马兰黄土的塑限 w_p 和液限 w_L 与黏粒含量表示为。

$$w_p = 0.015q_c + 15.5\% \quad (5)$$

$$w_L = 0.315q_c + 21.5\% \quad (6)$$

式中, w_p , w_L , q_c 分别为马兰黄土的塑限、液限和土体中黏粒含量(%)。

3.2 马兰黄土的渗透性

马兰黄土透水性强,土体水平与垂直渗透性具明显差异,水平渗透系数平均值 3.553×10^{-4} m/s,垂直渗透系数平均值 4.619×10^{-4} m/s,垂直与水平渗透系数比值为 1.300,马兰黄土有效渗透系数平均值为 5.827×10^{-4} m/s。如图 5, 6 所示,随着埋藏深度的增加,马兰黄土渗透性逐渐减弱^[8]。

$$K = \sqrt{K_v^2 + K_h^2} = 5.827\times10^{-4} \quad (7)$$

式中, K , K_v , K_h 分别为马兰黄土的有效渗透系数、垂直渗透系数与水平渗透系数(m/s)。

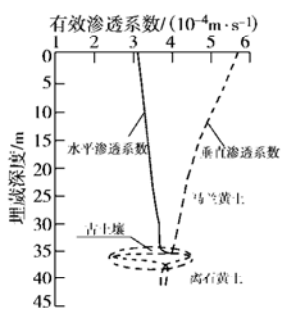


图 5 马兰黄土有效渗透系数随埋藏深度变化曲线

Fig. 5 Variation of permeability coefficients with depth

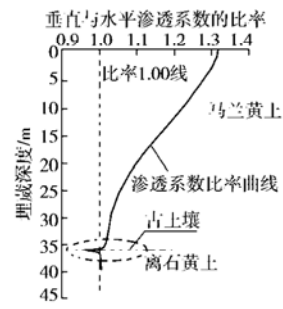


图 6 马兰黄土渗透系数比率随埋藏深度变化曲线

Fig. 6 Variation of K_v / K_h of Malan loess with the depth

3.3 马兰黄土的湿陷性

兰州马兰黄土属Ⅳ级自重湿陷性黄土,湿陷性明显大于东部地区的马兰黄土^[8],表层(5 m 以上)土体湿陷系数最大值达 0.20,中部土体(10~20 m)湿陷系数值介于 0.10~0.05,下部土体(20 m 以深)湿陷系数值介于 0.05~0.02。湿陷性是马兰黄土水敏感性特征的重要表现,随埋藏深度的增加,马兰黄土湿陷性相对减弱^[9],兰州马兰黄土湿陷性的界限孔隙率 e_{crit} 约为 0.90。如图 7~9 所示,马兰黄土的湿陷性主要受土体孔隙比、埋藏深度和含水率的影响^[4]。

表 2 兰州马兰黄土的湿陷性变化规律

Table 2 Variation of collapsibility of Malan loess

埋藏深度 /m	湿陷系数 δ_s				
	含水率 $w/\%$				
	$w < 6.0\%$	$w = 6.0\% \sim 8.0\%$	$w = 8.0\% \sim 10.0\%$	$w = 10.0\% \sim 12.0\%$	$w > 12.0\%$
5.0	0.172	0.160	0.142	0.123	0.107
10.0	0.102	0.091	0.077	0.062	0.045
15.0		0.060	0.044	0.023	0.011
>20.0	0.035	0.024	0.021	0.017	0.009

注:表中数据为试验平均值。

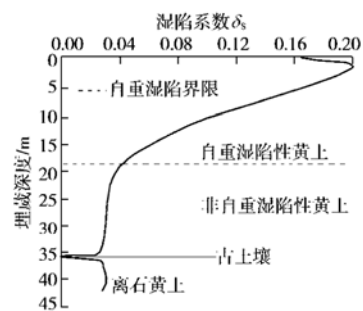


图 7 马兰黄土湿陷性随埋藏深度变化曲线

Fig. 7 Variation of collapsibility of Malan loess with the depth

4 马兰黄土抗剪强度的水敏感性特征

对马兰黄土抗剪强度的测试分别在试验室与原位采用直接剪切试验、环剪试验与原位大面积剪切试验方法进行,先后在兰州和欧洲尤怀特大学(荷兰)完

成。

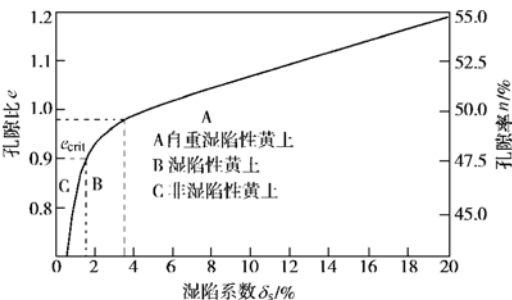


图 8 马兰黄土湿陷系数与孔隙比和孔隙率变化曲线
Fig. 8 Relationship of void ratio with collapsibility for Malan loess

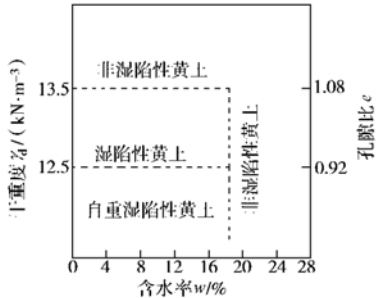


图 9 马兰黄土湿陷系数与干重度和含水率变化曲线
Fig. 9 Relationship of collapsibility with dry bulk density and moisture content

4.1 抗剪强度的水敏感性

在较高含水状态下, 马兰黄土中可溶盐溶解, 土体结构破坏, 强度降低。天然含水状态下马兰黄土峰值与残余抗剪强度相对较高^[10-11]; 高含水状态下 (含水率大于液限) 土体峰值与残余抗剪强度为天然含水状态下的 60%~80%; 干燥状态下 (含水率小于天然含水率的 50%), 黄土抗剪强度为天然含水状态下的 1.25~1.35 倍。

在不同的含水状态下, 马兰黄土黏聚力和内摩擦角呈现出不同的变化规律 (图 10)。低含水状态下马兰黄土黏聚力值最低, 内摩擦角值最高; 随含水率的增加黏聚力值增大, 内摩擦角值逐渐减小; 当含水率超过界限值时, 黏聚力值逐渐减小, 内摩擦角值缓慢增加。测试结果表明: 兰州马兰黄土的界限含水率 w_{CM} 为 $(16 \pm 2.00) \%$ 。

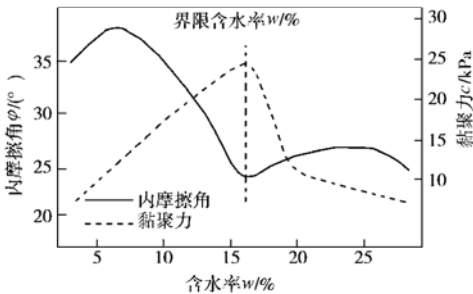


图 10 马兰黄土抗剪强度与含水率关系曲线
Fig. 10 Relationship of shear strength with moisture content

在较低含水状态下, 马兰黄土抗剪强度表现出类脆性变形特征, 在较高含水状态下, 抗剪强度表现出类塑性变形特征, 界限含水率 w_{CM} 为马兰黄土脆性与塑性变形特征发生转换的界限值 (见图 1)。

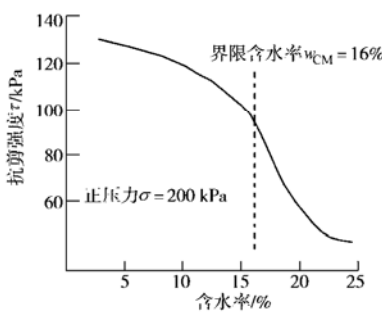


图 11 马兰黄土界限含水率特征曲线
Fig. 11 Critical moisture content of Malan loess

4.2 马兰黄土的类塑性指数

试验结果表明: 在较高的试验正压力和含水率条件下, 兰州马兰黄土表现出较强的塑性变形特征^[12], 定义抗剪强度峰值与峰值和残余抗剪强度差值的比率与抗剪强度峰值处的剪切应变的乘积为马兰黄土的塑性指数 Q_p , 塑性指数大小表明了土体塑性的强弱,

$$Q_p = s\tau_p / (\tau_p - \tau_r) \quad (8)$$

式中, Q_p 为马兰黄土的塑性指数, s 为马兰黄土抗剪强度峰值处的剪切应变 (mm)。

4.3 马兰黄土的强度比率界限

试验结果表明: 在不同的含水状态下马兰黄土抗剪强度在特定的比率界限内变化, 定义抗剪强度峰值与相应条件下试验正压力的比率为强度比率 $\xi = \tau_p / \sigma_v$, 马兰黄土抗剪强度在比率界限 0.50~0.70 内变化 (图 12), 平均值为 $\tau_p / \sigma_v = 0.60$ 。

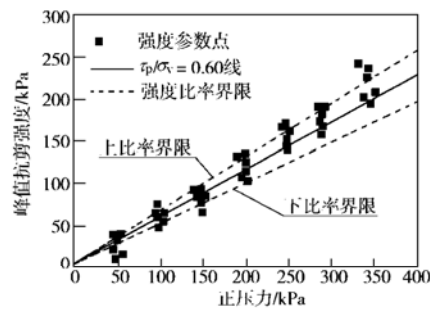


图 12 马兰黄土的强度比率界限
Fig. 12 Threshold of stress ratio of Malan loess

5 结 语

兰州马兰黄土是典型的水敏感性地质体, 在高含水率条件下, 马兰黄土表现出一定的塑性变形特征, 在干燥条件下, 土体的变形表现出一定的脆性特征。含水状态是影响马兰黄土性质的主要因素, 影响抗剪

强度的界限含水率 w_{CM} 、界定湿陷性特征的界限孔隙率值 e_{crit} 与强度比率界限 ξ 等对研究马兰黄土抗剪强度机制, 有效地减轻地质灾害等具有重要意义。

参考文献:

- [1] 赵景波. 中国黄土地环境研究的进展[J]. 干旱区地理, 2000, **23**(2): 186 - 190. (ZHAO Jing-bo. The new development in environment study from loess strata in China[J]. Arid Land Geography, 2000, **23**(2): 186 - 190. (in Chinese))
- [2] 刘东生, 孙继敏, 吴文祥. 中国黄土研究的历史、现状和未来——一次事实与故事相结合的讨论[J]. 第四纪研究, 2001, **21**(3): 185 - 207. (LIU Dong-sheng, SUN Ji-min, WU Wen-xiang. Past, present and future of the Chinese loess research: a discussion on the reality of facts and myth[J]. Quaternary Sciences, 2001, **21**(3), 185 - 207. (in Chinese))
- [3] 刘东生, 张宗祜. 中国黄土[J]. 地质学报, 1962, **42**(3): 1 - 14. (LIU Dong-sheng, ZHANG ZONG-hu. Chinese loess[J]. Chinese Journal of Geology, 1962, **42**(3): 1 - 14. (in Chinese))
- [4] 李保雄, 李永进. 兰州马兰黄土的工程地质特性[J]. 甘肃科学学报, 2003, **15**(3): 25 - 28. (LI Bao-xiong, LI Yong-jing. The geological engineering property of Malan loess in Lanzhou area[J]. Journal of Gansu Sciences, 2003, **15**(3): 31 - 34. (in Chinese))
- [5] EDWARD Derbyshire, TOM Dijkstra, YONG Jing-Li, BAO Xiong-li, et al. Landslides in the loess terrain of North-west China[M]. British Library Cataloguing in Publication Data, 2000: 131 - 159.
- [6] 高国瑞. 黄土湿陷变形的结构理论[J]. 岩土工程学报, 1990, **12**(4): 1 - 10. (GAO Guo-rui. A structure theory for collapsing deformation of loess soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1990, **12**(4): 1 - 10. (in Chinese))
- [7] 苗天德, 刘忠玉, 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. (MIAO Tian-de, LIU Zhong-yu, REN Jiu-sheng. Deformation mechanism and constitutive relation of collapsible loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, **21**(4): 383 - 387. (in Chinese))
- [8] 王家鼎, 张倬元, 李保雄. 黄土自重湿陷变形的脉动液化机理[J]. 地理科学, 1999, **19**(3): 271 - 276. (WANG Jia-ding, ZHANG Zhuo-yuan, LI Bao-xiong. A mechanism of un-selfload collapse—the saturated loess liquefaction caused by earth microtremors[J]. Scientia Geographica Sinica, 1999, **19**(3): 271 - 276. (in Chinese))
- [9] 胡再强, 沈珠江, 谢定义. 非饱和黄土的结构性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, **19**(6): 775 - 779. (HU Zai-qiang, SHEN Zhu-jiang, XIE Ding-yi. Research on structural behavior of unsaturated loess[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, **19**(6): 775 - 779. (in Chinese))
- [10] SHAN Peng-fei. A discussion on the environmental effect of landforms from disastrous landslides in the northern loess plateau region of China [J]. Regional Conference on Asian Pacific Countries, 1990(3): 29 - 33.
- [11] 苗天德, 慕青松, 刘忠玉, 马崇武. 低含水率非饱和土的有效应力及抗剪强度[J]. 岩土工程学报, 2001, **23**(4): 393 - 396. (MIAO Tian-de, MU Qing-song, LIU Zhong-yu, MA Chong-wu. Effective stress and shear strength of unsaturated soil with low water content[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, **23**(4): 393 - 396. (in Chinese))
- [12] 张志红, 赵成刚, 邓敏. 非饱和土固结理论新进展[J]. 岩土力学, 2005, **26**(4): 667 - 671. (ZHANG Zhi-hong, ZHAO Cheng-gang, DENG Min. Recent development of consolidation theories of unsaturated soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, **26**(4): 667 - 671. (in Chinese))