

文章编号:1004-4116(2023)01-0038-06

兰州市非饱和黄土水土关系与力学性质变化规律

孙富强^{1,2},张永军^{1,2}

(1. 甘肃省地质环境监测院,甘肃 兰州 730050;

2. 甘肃省地下水工程及地热资源重点实验室,甘肃 兰州 730050)

摘要:灌溉和降雨是兰州南北两山绿化区黄土斜坡失稳的最主要诱发因素。灌溉或降雨作用下,黄土斜坡失稳的本质是水与非饱和黄土相互作用后黄土力学性质改变的结果。因此,研究非饱和黄土中水土关系及力学性质变化规律,不仅为定量评价选取参数提供依据,而且是深入分析黄土斜坡变形破坏机理的基础。本次研究在现场调查基础上,以在城关区青白石、桃树坪、九州3处黄土斜坡上采集的132组原状黄土,以及在皋兰山Ⅲ-2滑坡上采集的16组滑体和滑带扰动样的室内试验结果为基础,分析非饱和黄土水土相互作用规律及水土关系特征。试验结果显示抗剪强度及其参数变化随含水率(饱和度)不断变化是水土作用的直接结果,降雨或灌溉或其他地表水体入渗后黄土含水量(饱和度)变化是导致黄土抗剪强度变化的最主要因素。

关键词:非饱和黄土;水土关系;抗剪强度;力学性质;兰州市

中图分类号:S157;TU444

文献标志码:A

兰州市地处黄河上游,位于黄土高原、青藏高原和内蒙古高原交汇处,地貌类型多样、地形条件复杂,以黄土为主的易滑地层分布广泛,新构造运动活跃,降水时段集中,人类工程活动强烈,以崩塌、滑坡为主的斜坡地质灾害发育。深入认识、分析强降水、绿化灌溉等作用对兰州地区地质环境背景的影响和改变,开展兰州黄土斜坡非饱和黄土的水土关系研究对于该地区的地质灾害风险防控具有十分重要的意义。目前,黄土水土关系研究已经取得了较多的成果,王海曼等^[1]建立了孔隙比与饱和/非饱和渗透系数关系模型;张文哲^[2]探究了水—盐作用下土体力学特征变化的微观机理及其对土体力学性质的影响;闫亚景等^[3]研究了可溶盐对兰州非饱和和重塑黄土抗剪强度的影响;康海伟^[4]对原状黄土土—水特征曲线及孔隙特征做了研究。但现有研究中,对兰州市黄土水土关系方面的研究仍较缺乏,因此,笔者以在兰州市城关区青白石、桃树坪、九州三处黄土斜坡上采集的132组原状黄土,以及在皋兰山Ⅲ-2滑坡上采集的16组滑体和滑带扰动样的室内试

验结果为基础,系统地进行了黄土水土相互作用规律及水土关系特征研究,以期对兰州市地质灾害防治相关技术工作提供一定的理论依据和实际指导。

1 黄土的基本物理性质与水理性质

兰州市区几乎95%以上黄土斜坡破坏发生于中—上更新统黄土和黄土状土中^[5]。故青白石、桃树坪、九州三处黄土斜坡上黄土试样均采黄土和黄土状土。皋兰山Ⅲ-2滑坡滑带沿黄土与新近系桔红色泥岩接触带发育,滑带物质以黄土为主夹少量泥岩碎块。所用试样均为采自探槽中的原状块状样。

1.1 黄土试样的基本物理性质

采用常规环刀法、筛分+比重计法和液塑限联合测定法分别测试3个场地黄土和一处滑坡滑带的天然含水量、颗粒级配、干密度、液塑限、孔隙比等基本物理性质。测试结果显示(表1),黄土试样中粉粒

收稿日期:2022-06-14

基金项目:甘肃省自然资源厅中央财政自然灾害防治体系建设补助资金项目(甘资财发[2020]16号)

作者简介:孙富强(1990~),男,甘肃兰州人,水工环地质工程师,主要从事地质灾害防治等相关工作。E-mail:492742945@qq.com

表 1 黄土试样物理性质指标一览表

Table 1 Summary of physical parameters of loess specimens

取样地点	干密度 (kN/m ³)	天然含水率 (%)	液限 (%)	塑限 (%)	塑性指数 I _p	孔隙比 e	粒组及含量(%)		
							粘粒	粉粒	砂粒
九州	13.4	12.1	29.1	20	9.1	1.01	11.77	82.36	5.87
青白石	15.5	13.1	26.4	17.6	8.8	0.88	12.43	83.45	6.23
桃树坪	12.0	12.7	28.0	18.1	9.9	1.13	16.79	82.43	0.78
皋兰山	15.3	17.1	28.0	17.9	10.1	0.72	7.42	89.35	3.23

含量均大于 80%,塑性指数小于等于 10,均属典型的粉土。天然状态下,各处黄土均处于可塑状态。不同地段,黄土中粘粒含量、干密度、孔隙比等略有差异。青白石和皋兰山 III-2 滑坡滑带附近黄土干密度明显高于其他各处,其他黄土试样干密度均较小,孔隙比接近或略大于 1.0,反映黄土(包括皋兰山 III-2 滑坡滑带)结构疏松。

1.2 含盐量

采用浸出液制取法,测试 4 个地段黄土易溶盐含量。依据测试结果(表 2),各处黄土均含有少量易溶盐,但含量小于 0.3%。故易溶盐对这些地区黄土物理力学性质影响微弱。

表 2 黄土可溶盐含量测试结果

Table 2 Soluble salt content of loess soil

取样地点	易溶盐(%)
九州	0.13
青白石	0.27
桃树坪	0.18
皋兰山	0.22

1.3 渗透性及其各项异性特征

黄土渗透性是控制水土相互作用的基本水理性质。黄土渗透性各项在水平和垂直方向差异程度决定降雨或灌溉条件下,地表水的入渗特征^[6-8]。基于变水头方法的测试结果显示(表 3,图 1),不同斜坡上黄土渗透性有明显差异,且每处斜坡不同部位渗透性差异很大,反应黄土渗透性空间上不均匀性显著,同一上部为垂直渗透系数与水平渗透系数不等,除

表 3 黄土渗透系数测试结果

Table 3 Loess permeability coefficient

取样地点	取样深度(m)	垂直渗透系数 K _v (10 ⁻⁵ cm/s)	水平渗透系数 K _h (10 ⁻⁵ cm/s)
九州	1.6 ~ 2.4	0.657 ~ 7.86	0.596 ~ 5.75
青白石	1.7 ~ 2.4	0.489 ~ 8.84	0.524 ~ 3.10
桃树坪	1.2 ~ 2.1	4.46 ~ 9.13	3.11 ~ 9.64

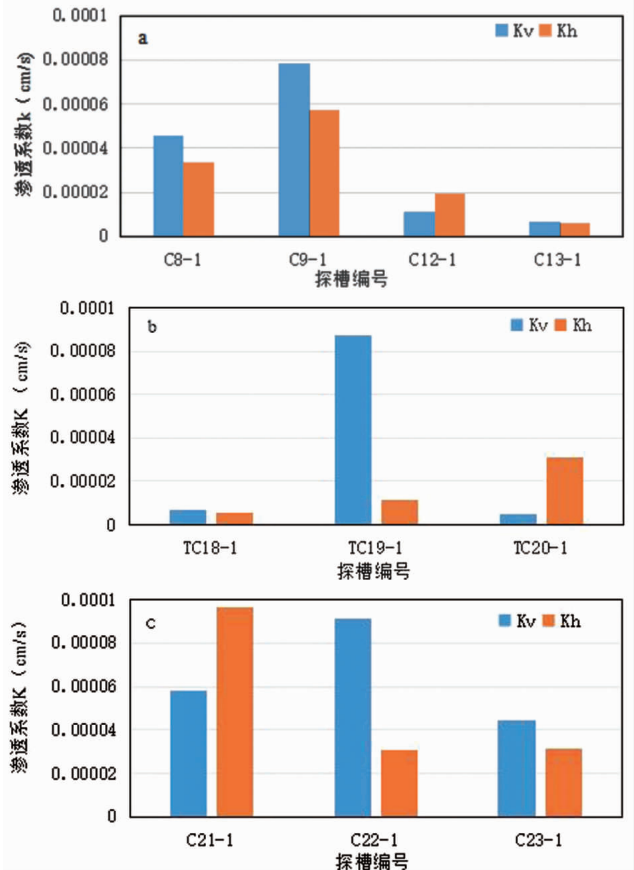


图 1 不同斜坡黄土垂直与水平渗透系数变化特征

Fig. 1 Variation of vertical and horizontal permeability coefficient of the different slope

(a—九州半山雅居北侧;b—青白石;c—桃树坪)

个别试样外,多数结果为垂直渗透系数略大于水平渗透系数,因此地表水在黄土中以垂直入渗为主,在非饱和黄土中,水平入渗可能性不大。由于试验所用试样是小尺寸环刀样,故室内试验所得渗透系数小于实际渗透系数^[9],若考虑实际黄土垂直节理发育特点,现场黄土的渗透系数应该远大于室内测试结果。

2 非饱和黄土水土关系变化规律

非饱和土基质吸力随饱和度或含水量变化的水

土特征曲线是表征水土关系的最直观显示。国内外学者通过大量实验研究发现，随着饱和度或含水量的降低，非饱和砂土内基质吸力的不断增大趋势呈现出明显的阶段性^[10-13]，根据土—水特征曲线的切线斜率变化特点，可将基质吸力变化阶段分为三个区域：即边界效应区、过渡区和非饱和残余区，其中过渡区又可分为主要过渡区和次要过渡区^[14](图2)。采用美国土壤仪器公司生产的5 MPa压力板仪测量土水特征曲线。

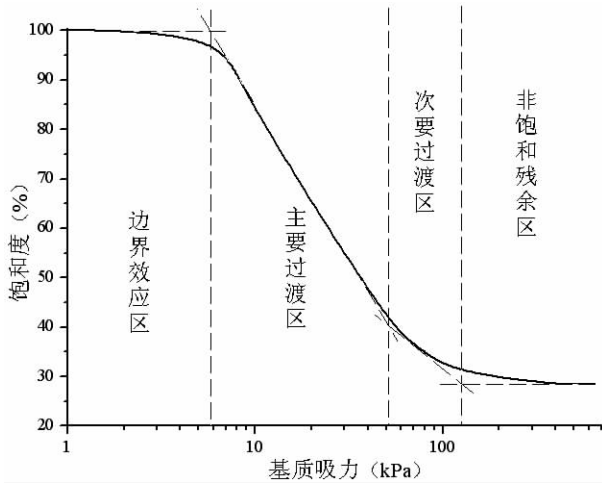


图2 典型土水特征曲线及其分区

Fig. 2 Typical soil-water characteristic curve and its partition

2.1 九州黄土

非饱和黄土—水特征曲线显示，黄土中基质吸力随着饱和度增加明显减小(图3)。以进气值6 kPa、主要过渡区与次要过渡区界限值100 kPa、残

余基质吸力300为分界，基质吸力随饱和度也呈现明显的三个区域变化特点。当基质吸力小于6 kPa时，土体持水能力达到最大值，对应土体饱和度大于90%，含水量40%，大于土体液限，此时基质吸力随含水量、饱和度增大基本不变。当基质吸力大于6 kPa、小于100 kPa时，对应土体含水量40%~21% (大于等于塑限)、饱和度96%~40%，基质吸力随含水量、饱和度增大而急剧减小；当基质吸力大于100 kPa、小于300 kPa时，对应含水量21%~8%、饱和度40%~21%，土体基质吸力随含水量和饱和度增加，缓慢增加；当基质吸力大于300 kPa时，黄土含水量低于8%、饱和度小于21%时，基质吸力达到天然条件下的最大值。因此，对于九州马兰黄土，含水量21%~40%区间是基质吸力对抗剪强度影响最大区间。也就是黄土滑坡最易发生的含水量变化区间。含水量8%、饱和度21%时，马兰黄土抗剪强度可能达到最大值。

2.2 桃树坪黄土

与九州马兰黄土类似，桃树坪地区马兰黄土中基质吸力也呈现随着饱和度增加明显减小的变化特征(图3)。不同于九州黄土，桃树坪黄土中土体持水最大值对应的含水量33%；基质吸力变化强烈的含水量为33%~20%、对应饱和度96%~58%；当基质吸力大于300 kPa时，黄土含水量低于12%、饱和度小于37%时，基质吸力达到天然条件下的最大值；含水量20%~33%区间是基质吸力对抗剪强度影响最大区间。

九州黄土与桃树坪黄土在水土特征曲线上的差

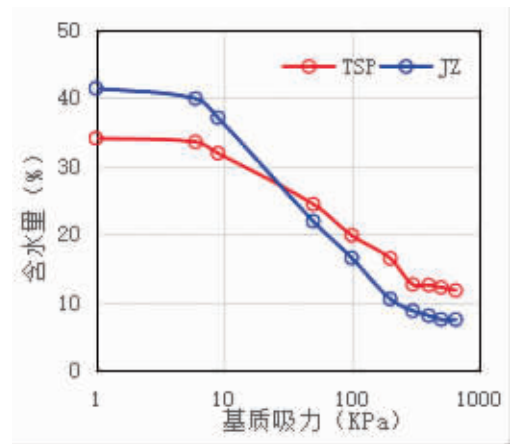
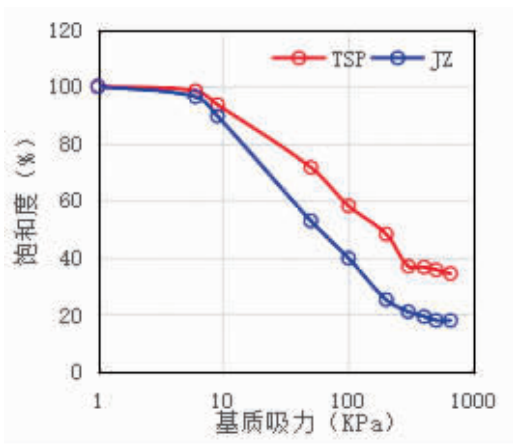


图3 非饱和黄土水特征曲线(左:饱和度与基质吸力;右:含水量与基质吸力)

Fig. 3 Water-soil characteristic curves of unsaturated loess

TSP—桃树坪黄土样品;JZ—九州黄土样品

异与土体的颗粒级配、干密度、孔隙比差异密切相关。桃树坪黄土干密度小、孔隙比大、粘粒含量多,故而残余饱和度大、起始饱和度低,黄土中基质吸力对含水量或饱和度变化最为敏感。

3 非饱和黄土抗剪强度随饱和度变化规律

在斜坡形态及斜坡结构一定条件下,斜坡岩土抗剪强度控制斜坡稳定性^[15]。在兰州地区,降雨或灌溉或其他地表水体入渗后黄土含水量(饱和度)变化是导致黄土抗剪强度变化的最主要因素^[16]。因此本次研究,采用直剪试验方法测试黄土抗剪强度及其参数,从黄土含水量(饱和度)变化角度研究黄土抗剪强度变化规律。由于黄土斜坡破坏多为快速滑坡或崩塌且以浅层为主^[17-19],故对于非饱和试样,为了保证剪切过程中土体孔隙水压力不消散,采取 14 mm/min 的快剪速度剪切。剪切速率 1.0%/min,围压 25 kPa、50 kPa、75 Pa。试样饱和度设定六个级别:20%、40%、50%、60%、70%、80%。不同含水量黄土试样采用水膜转移法制作。受试样质量和数量所限,仅对九州、桃树坪两处黄土试样进行了抗剪强度测试。

3.1 九州黄土

3.1.1 抗剪强度随饱和度(含水量)变化规律

测试结果显示,随着饱和度自 20% 增大到 80%,各级正应力下,黄土抗剪强度非线性降低,变化特征基质吸力随饱和度变化基本同步。饱和度大于 50%(含水量 21%)后,抗剪强度急剧降低;反之,抗剪强度降低速率减小;饱和度 40%~50%(含水量 16%~21%)(图 4)。抗剪强度与基质吸力变化的基本同步,印证了饱和度增大后非饱和黄土中抗剪强度降低是基质吸力减小的结果。

3.1.2 抗剪强度参数随饱和度(含水量)变化规律

不同饱和度条件下,九州黄土抗剪强度参数列于表 4。

测试结果显示,随饱和度(含水量)增大,黄土内聚力、内摩擦角减小,反映非饱和黄土中基质吸力对

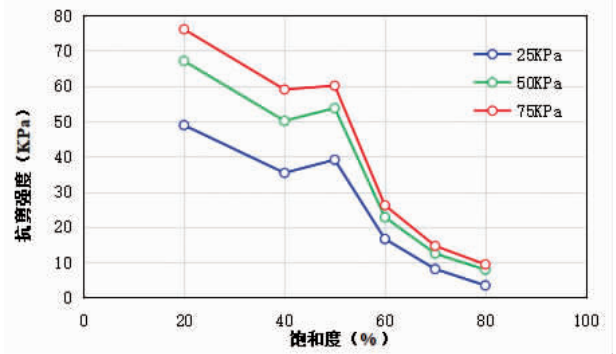


图 4 九州黄土抗剪强度随饱和度变化曲线
Fig. 4 Shear strength variation with saturation of loess samples in Jiuzhou

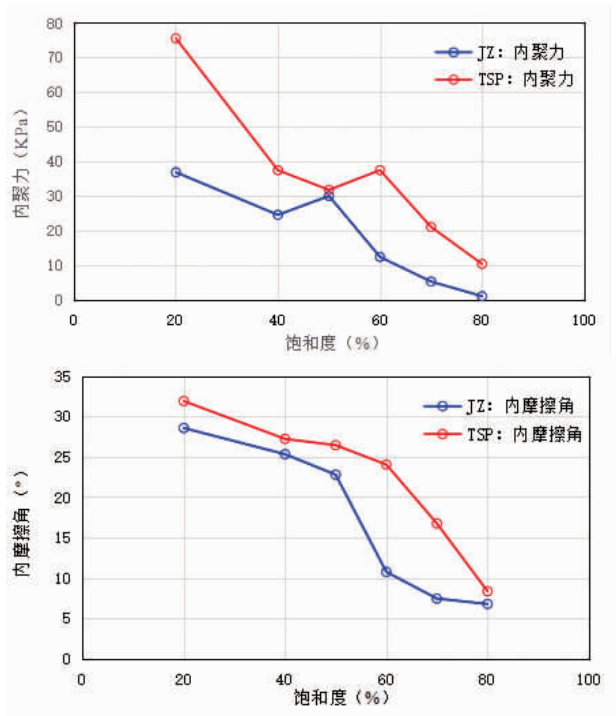


图 5 非饱和黄土内聚力、内摩擦角随饱和度变化曲线
Fig. 5 Variation of cohesion and internal friction angle with saturation of unsaturated loess samples
TSP—桃树坪黄土样品;JZ—九州黄土样品

表 4 黄土抗剪强度参数测试结果

Table 4 Shear strength parameters of loess samples

取样地	饱和度(%)	20	40	50	60	70	80
九州	内聚力(kPa)	36.8	24.5	29.9	12.3	5.1	0.9
	内摩擦角(°)	28.6	25.3	22.8	10.8	7.5	6.8
桃树坪	内聚力(kPa)	75.6	37.4	31.7	37.4	21.0	10.3
	内摩擦角(°)	31.9	27.2	26.4	24.0	16.8	8.4

内聚力与内摩擦角均产生控制作用,但是内聚力变化与抗剪强度变化基本同步,显示内摩擦角变化与基质吸力降低同步性更显著,显示其对内摩擦角影响更大(图5)。

3.2 桃树坪黄土

3.2.1 抗剪强度随饱和度(含水量)变化规律

与九州黄土类似,随着饱和度自20%增大到80%,各级正应力下,黄土抗剪强度非线性降低。不同之处是,桃树坪黄土在饱和度大于60%(含水量20%)后,抗剪强度急剧降低;反之,抗剪强度降低速率减小;饱和度40%~60%(含水量15%~20%)(图6)。

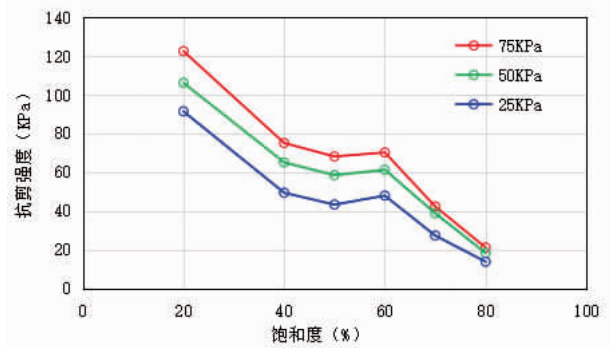


图6 桃树坪黄土抗剪强度随饱和度变化曲线

Fig. 6 Shear strength variation with saturation of loess samples in Taoshuping

3.2.2 抗剪强度参数随饱和度(含水量)变化规律

不同饱和度条件下,桃树坪黄土抗剪强度参数列于表4。图5显示,黄土抗剪强度参数变化特征与九州黄土相同,即:黄土内聚力、内摩擦角减小,反映非饱和黄土中基质吸力对内聚力与内摩擦角均产生控制作用,但是内聚力变化与抗剪强度变化基本同步,显示内摩擦角变化与基质吸力降低同步性更显著,显示其对内摩擦角影响更大(图5)。

4 结论

(1)测试结果显示,黄土试样均属典型的粉土。不同地段黄土中粘粒含量、干密度、孔隙比等略有差异。青白石和皋兰山Ⅲ-2滑坡滑带附近黄土干密度明显高于其他各处,反映黄土(包括皋兰山Ⅲ-2滑坡滑带)结构疏松。易溶盐对这些地区黄土物理力学性质影响微弱。除个别试样外,多数结果为垂直渗透系数略大于水平渗透系数,因此地表水在黄土中以

垂直入渗为主。

(2)九州黄土含水量21%~40%区间是基质吸力对抗剪强度影响最大区间。也就是黄土滑坡最易发生的含水量变化区间。含水量8%、饱和度21%时,马兰黄土抗剪强度可能达到最大值。而桃树坪黄土中含水量20%~33%区间是基质吸力对抗剪强度影响最大区间。黄土含水量低于12%、饱和度小于37%时,基质吸力达到天然条件下的最大值。

(3)测试结果显示,九州黄土饱和度大于50%(含水量21%)后,抗剪强度急剧降低;反之,抗剪强度降低速率减小。而桃树坪黄土在饱和度大于60%(含水量20%)后,抗剪强度急剧降低;反之,抗剪强度降低速率减小。另外,不同饱和度条件下,九州黄土与桃树坪黄土黄土抗剪强度参数变化特征相同,显示内摩擦角变化与基质吸力降低同步性更显著,显示其对内摩擦角影响更大。

参 考 文 献

- [1] 王海曼,倪万魁.不同干密度压实黄土的饱和/非饱和和渗透系数预测模型[J].岩土力学,2022,43(03):729-736. DOI:10.16285/j.rsm.2021.0735
- [2] 张文哲.水-盐作用下黄土力学特征及微观机理研究[D].西安:长安大学,2021. DOI:10.26976/d.cnki.gchau.2021.000635
- [3] 闫亚景,文宝萍,黄志全.可溶盐对兰州非饱和和重塑黄土抗剪强度的影响[J].岩土力学,2017,38(10):2881-2887. DOI:10.16285/j.rsm.2017.10.014
- [4] 康海伟.原状黄土土-水特征曲线及孔隙特征研究[D].西安:长安大学,2020. DOI:10.26976/d.cnki.gchau.2020.000874
- [5] 王健,侯小强,李小强,等.兰州及周边地区灌溉对于黄土滑坡微结构的变化研究[J].城市道桥与防洪,2016(09):208-210+228+21. DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.2016.09.058
- [6] 王力,李喜安,何军,等.不同黏粒含量对黄土渗透系数影响的试验研究[J].水土保持通报,2018,38(02):95-101. DOI:10.13961/j.cnki.stbth.2018.02.016
- [7] 张卜平,朱兴华,成玉祥,等.黄土潜蚀机理及其致灾效应研究综述[J].中国地质灾害与防治学报,2021,32(06):41-52. DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2021.06-06
- [8] 李燕,李同录,侯晓坤,等.用孔隙分布曲线预测压实黄土非饱和和渗透曲线及其适用范围的探讨[J].岩土力学,2021,42(09):2395-2404. DOI:10.16285/j.rsm.2021.0277
- [9] 任宏玉,李喜安,张玉涛,等.黄土渗气系数原位测试原理方法及适用性试验研究[J].工程地质学报,2022,30(02):347-356. DOI:10.13544/j.cnki.jeg.2021-0271
- [10] 冯晓腊,张睿敏,崔德山,等.基质吸力与黏粒含量对砂土抗剪强度的影响[J].科学技术与工程,2017,17(34):97-103
- [11] 徐鹏,韦博蔓,唐兆建,等.黏粒含量对非饱和和重塑砂土基质吸力的影响[J].公路,2015,60(12):228-231

- [12] 董倩,侯龙,赵宝云. 基质吸力对非饱和粉质砂土抗剪强度的影响 [J]. 中南大学学报(自然科学版),2012,43(10):4017-4021
- [13] 王智超,罗磊,田英辉,等. 非饱和压实土率敏性及蠕变时效特征试验研究[J/OL]. 岩土力学,2022(07):1-10[2022-06-20]. DOI:10.16285/j.rsm.2021.1734
- [14] 丁小刚,马丽娜,张戎令,等. 非饱和和重塑弱膨胀土微观结构及土-水特征曲线试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版),2022,53(01):350-360
- [15] 李冠野,邓华锋,李建林,等. 重复剪切作用下泥质充填结构面剪切力学特性试验研究 [J]. 工程地质学报,2022,30(02):374-382. DOI:10.13544/j.cnki.jeg.2021-0440
- [16] 高晖,张永军,张旭光. 兰州城区黄土斜坡地质灾害影响因素分析[J]. 甘肃地质,2012,21(03):30-36
- [17] 李同录,李颖喆,赵丹旗,等. 对水致黄土斜坡破坏模式及稳定性分析原则的思考 [J]. 中国地质灾害与防治学报,2022,33(02):25-32. DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2022.02-04
- [18] 易志强,龙建辉,张吉宁,等. 水平软弱夹层黄土滑坡形成机制及启动角度[J]. 科学技术与工程,2022,22(11):4313-4320
- [19] 孙萍萍,张茂省,江睿君,等. 降雨诱发浅层黄土滑坡变形破坏机制[J]. 地质通报,2021,40(10):1617-1625

WATER-SOIL RELATIONSHIP AND MECHANICAL PROPERTIES OF UNSATURATED LOESS IN LANZHOU CITY

SUN Fu-qiang^{1,2}, ZHANG Yong-jun^{1,2}

(1. Gansu Institute of Geo-environmental Monitoring, Lanzhou 730050, China;

2. Key Laboratory of Groundwater Engineering and Geothermal Resources of Gansu Province, Lanzhou 730050, China)

Abstract: Irrigation and rainfall are the most important factors for the instability of the loess slope in the green area of the north and south mountains of Lanzhou. Under irrigation or rainfall, the essence of the destabilization of the loess slope is the result of the change of the mechanical properties of the loess after the interaction of water with unsaturated loess. Therefore, the study of the relationship between water and soil and the change of mechanical properties in unsaturated loess not only provides a basis for quantitative evaluation and selection of parameters, but also is the basis for in-depth analysis of the deformation and failure mechanism of loess slope. Based on the on-site investigation, the study was mainly based on the indoor test results of 132 groups of pristine loess collected on the three loess slopes of Qingbaishi, Taoshuping and Kyushu in Chengguan District, and 16 groups of slides and slip belt disturbance samples collected on the III.-2 landslide of Gaolan Mountain, and the water-soil interaction law and water-soil relationship characteristics of unsaturated loess were analyzed. The experimental results show that the continuous change of shear strength and its parameters with the moisture content (saturation) is the direct result of soil and water, and the change of loess water content (saturation) after rainfall or irrigation or other surface water infiltration is the most important factor leading to the change of shear strength of loess.

Key words: unsaturated loess; soil and water relations; shear strength