

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2020.06.017

三峡库区高边坡紫色土抗剪强度的水敏性特征*

黄海均^{1,2}, 毛海涛¹, 严新军², 申纪伟¹, 侍克斌², 杨 印¹

(1. 重庆三峡学院土木工程学院, 重庆 404100; 2. 新疆农业大学水利与土木工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830052)

摘要: 为了研究高边坡紫色土的抗剪强度及变形随含水率的变化规律, 在不同围压下对不同含水率的非饱和重塑紫色土进行了固结不排水三轴试验。结果表明: 在不同的含水率及围压条件下, 土体应力—应变关系曲线均呈现出“持续硬化”甚至“加速硬化”现象。其应力—应变关系曲线经历了3个阶段: 轴向应变0%~2.3%为弹性阶段, 2.3%~4%为应变硬化阶段, 4%后逐渐变为屈服阶段。在同一围压下, 土体主应力差峰值随含水率的增加而降低, 其峰值下降幅度最大可达67.37%。不同含水率下的最大主应力差与围压均表现出较好的线性关系。在给定含水率下, 主应力差峰值随围压的增加而明显增大, 其峰值增大幅度最大可达150.98%, 但随着含水率的升高, 这种增大趋势逐渐减小, 且围压对紫色土抗剪强度影响约为含水率对其影响的66.63%。随着含水率的增加, 土壤的内聚力先增加后减小, 峰值处的含水率为12%; 而土壤的内摩擦角随含水率的增加呈现一阶线性减小, 且下降程度最大可达56.88%。土体任意平面(破坏面)上 σ - τ 曲线的斜率随着含水率的增加而逐渐减小, 而破坏包面逐渐变缓。分析并讨论了含水率对紫色土内部结构、颗粒间作用力及特性的影响, 以期对三峡库区高边坡紫色土的综合治理提供理论支持和技术支撑。

关键词: 三轴试验; 抗剪强度; 含水率; 非饱和土

中图分类号: TU452 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2020)06-0974-10

Water Sensitivity Characteristics of Shear Strength of Purple Soil in High Slope of Three Gorges Reservoir Area

HUANG Haijun^{1,2}, MAO Haitao¹, YAN Xinjun², SHEN Jiwei¹, SHI Kebin², YANG Yin¹

(1. School of Civil Engineering, Chongqing Three Gorges University, Chongqing, Chongqing 404100, China;

2. School of Water Conservancy and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China)

Abstract: Purple soil is widely distributed in the Three Gorges Reservoir area, and the purple soil on the high slope is easy to be eroded and likely to slide. In order to study the variation of shear strength and deformation of purple soil with water content on high slopes, consolidated undrained triaxial tests were carried out on unsaturated remolded purple soil specimens with different water contents under different confining pressures. The results showed that under different water content and confining pressure conditions, the stress-strain curves of soils exhibit the phenomenon of “continuous hardening” or even “accelerated hardening”. The stress-strain relationship curve undergoes three stages: elastic

* 收稿日期: 2018-10-11; 修回日期: 2018-11-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(41602367)、重庆市科委基础与前沿研究计划项目(cstc2018jcyjAX0673)、重庆市教委科学技术研究项目(KJ1601017)资助

作者简介: 黄海均(1994-), 男, 硕士。主要从事水岩耦合机理研究。Email: huanghj94@163.com

通讯作者: 毛海涛(1980-), 男, 教授, 硕导, 博士。主要从事水利工程渗流机理研究。Email: maohaitao1234@163.com

stage with an axial strain interval of 0%~2.3%, strain hardening stage with an axial strain interval of 2.3%~4%, and yield stage with axial strain larger than 4%. Under the same confining pressure, the peak value of soil principal stress decreases with the increase of water content, and the peak value decreases by up to 67.37%; the maximum principal stress difference and confining pressure show a good linear relationship under different water contents. At a given water content, the peak value of principal stress difference increases obviously with the increase of confining pressure, and the maximum increment is about 150.98%. However, with the increase of water content, the increasing trend decreases gradually, and the effect of confining pressure on the shear strength of purple soil is about 66.63% of that of water content. With the increase of water content, the cohesion of soil increases first and then decreases, and the water content at the peak is 12%. The internal friction angle of soil shows a first-order linear decrease relationship with the increase of water content, and the degree of decline can reach up to 56.88%. The slope of the σ - τ curve on the arbitrary plane of the soil gradually decreases with the increase of water content, and the damage envelope plane appears to gradually slow down. The influence of water content on the internal structure, intergranular force and characteristics of purple soil is analyzed and discussed in order to provide theoretical and technical support for comprehensive treatment of purple soil on the high slope of Three Gorges Reservoir.

Keywords: triaxial test; shear strength; water content; unsaturated soils

引 言

三峡库区地貌特征以山地、丘陵为主,且由于库区移民与大规模基础设施建设(如水利水电工程、高速公路和铁路等),导致大量高边坡的形成。为岩土边坡安全性带来许多挑战。

紫色土是三峡库区最为重要、占比最大的旱地土壤类型,其分布面积约占库区土壤分布总面积的30.04%^[1]。非饱和紫色土的力学性质较为复杂,且兼有极易风化崩解破碎,遇水强度急剧下降等特性。万州地处三峡库区腹心,属于亚热带季风湿润气候,雨季长,降雨量大,水力侵蚀活跃,且由于库区蓄水,整个库区平均年降水量较蓄水之前又增大10%左右^[2],这导致土体强度与稳定性都急剧降低甚至丧失,从而给该地区的工程建设以及区内水土保持都带来极大的隐患。而在进行滑坡的稳定性或抗滑、支挡结构土压力、地基承载力等岩土工程计算时,都要涉及到土体强度指标^[3]。因此,合理、全面地掌握非饱和紫色土的工程性质,特别是研究非饱和紫色土变形和强度随含水率变化的规律,对该区域内的水土保持及工程建设都具有较为重要的意义与参考价值。

在边坡稳定计算中,土的抗剪强度是十分重要的参考指标,已有研究表明,含水率的变化对强度的影响要大于其他因素。因此,许多研究者针对土壤的力学性质随含水率的变化做了大量的研究。张宁宁等^[4]研究了含水率对原状黄土强度的影响;王海东等^[5]进行了非饱和砂土在不同含水率下强度特性试验研究;黄斌等^[6]对滑带土强度及变形随含水率变化的规律进行了分析;黄琨等^[7]研究了不同含水率对非饱和土的力学特性影响;王亮等^[8]进行了不同含水率对重塑淤泥抗剪强度影响的试验。胡斐南等^[9]研究重庆合川地区的紫色土区水稻土,结果显示紫色水稻土强度指标与含水率有一定关系,且存在一个临界含水率;倪九派等^[10]利用室内三轴仪对潼南地区的紫色土进行了不固结不排水试验,试验结果表明当含水率相同时,随着干密度增大土壤抗剪强度逐渐升高。大量的试验结果表明,含水率对土体力学特性的改变有着较为明显的作用。此外,由于各地区的土壤存在明显的地域性差异,其抗剪强度随含水率变化特征也不尽相同,且已有研究尚未涉及高边坡半风化紫色土的试验研究。

本文针对重庆万州地区高边坡紫色土,在不同含水率和围压作用下进行固结不排水三轴试验,以

研究含水率与围压对紫色土抗剪强度参数及应力—应变曲线特性的影响。通过对试验数据的回归分析和函数拟合,说明含水率对抗剪强度指标的影响大小,并就其影响规律进行归纳分析。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

研究区地貌总体属于构造~侵蚀、剥蚀低山丘陵地貌^[11]。属亚热带季风湿润气候,日照充足,雨量充沛。年均气温 17.7℃,年均降水 1 243 mm。试验用土取自重庆市万州区双河口高边坡,取样位置如图 1 所示,地理位置介于北纬 30°44′18.18″~30°45′30.66″,东经 108°22′46.72″~108°23′3.19″。研究区地处长江三峡水库中段,区位独特,行政隶属重庆,处三峡库区腹心,是成渝城市群沿江城市带区域中心城市。

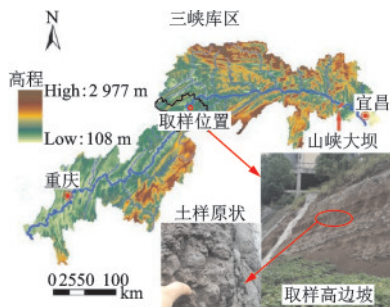


图1 研究区域与取样位置

Fig.1 The location map of sampling

1.2 土壤样品采集与物理性质指标

采用随机布设方法对试验土壤样品进行采集,在取样区布设 36 个采样点,通过梅花形采样法采集 20~40 cm 的混合土样 50 kg 带回实验室风干,用于抗剪强度测定^[12]。按照《土工试验规程》^[13]SL1999 试验方法,测定土壤样品主要物理性质指标见表 1,试验土样颗粒级配曲线如图 2 所示。

表 1 试验土样的物性指标

Table 1 Physical properties of test soil samples

| 干密度 $\rho_d / (\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$ | 含水率 $\omega / \%$ | 液限 $\omega_l / \%$ | 塑限 $\omega_p / \%$ | 塑性指数 I_p |
|---|----------------------|-----------------------|-----------------------|---------------|
| 1.57 | 8.91% | 31.6 | 8.3 | 23.3 |

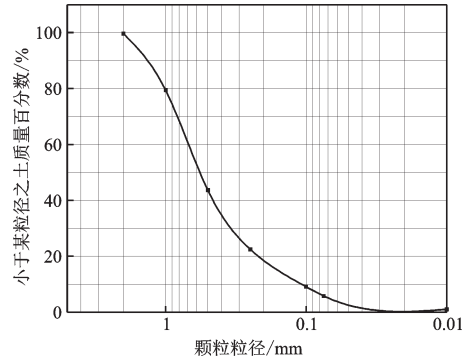


图2 紫色土颗粒级配曲线

Fig.2 Particle size distribution curve for soil samples

1.3 试验设计

将采集的紫色土风干碾散并按试验要求通过孔径 2 mm 的筛,测定风干土含水率,装入保湿袋备用。为准确测定含水率对紫色土强度特性的影响,且因非饱和土的强度要高于饱和土,本次试验参照紫色土液塑限值共设 9 个不同含水率梯度,即 8%、10%、12%、14%、16%、18%、20%、22%、24%。称取过筛的风干土样平铺于搪瓷盘内,按公式(1)计算需水量,将水均匀喷洒于土样上,充分拌匀后装入盛土容器内盖紧,润湿一昼夜,然后测定润湿土样不同位置处的含水率,不少于两点,保证含水率与目标含水率之差不得大于 1%,从而配制成不同含水率散装土样。试件需水量计算公式为:

$$m_w = \frac{m_0}{1 + 0.01\omega_0} \times 0.01(\omega_1 - \omega_0) \quad (1)$$

式中, m_w 为制备试样所需的加水量(g); m_0 为风干土的质量(g); ω_0 为风干土的含水率(%); ω_1 为制样要求的含水率(%)。

根据设计的干密度和饱和器容积,按公式(2)制作不同含水率的试件,其计算公式为:

$$m_0 = (1 + 0.01\omega_0)\rho_d v \quad (2)$$

式中, ρ_d 为试样的干密度(g/cm^3); v 为试样体积(cm^3)。

1.4 试验制备与测定方法

本试验在重庆三峡学院的 TSZ 全自动三轴仪上进行固结不排水(CU)剪切试验,该三轴剪切试件的直径为 39.1 mm,高度为 80 mm,设计干密度为 1.59 g/cm^3 。根据预定的含水率和干密度,称取一定质量土样,分层击实,每层击实时用削土刀轻刮接触面,避免土样出现分层现象。试件制作完成

后,应取出三轴试样称量,检验试件干密度是否达到预设目标。试验共设36个试件,含水率设置为9个不同梯度(8%、10%、12%、14%、16%、18%、20%、22%、24%),径向围压(σ_3)处理为4个水平(100、200、300、400 kPa),分别在不同围压下进行试验,以消除试样之间的误差,得到准确的抗剪强度指标。剪切速率设定为0.4 mm/min。三轴试验数据采用土工试验微机数据采集处理系统进行采集、整理和分析。

2 结果与分析

2.1 紫色土的应力—应变曲线特性

重塑非饱和紫色土在不同含水率和围压条件下的主应力差(偏应力)与轴向应变的关系曲线如

图3所示。

由图3可以看出,在各个不同的含水率条件下,土体的主应力差与轴向应变的关系曲线均呈现出“持续硬化”甚至“加速硬化”现象。综合对比发现,应力—应变关系曲线大致可分为3个阶段:第1阶段,在剪切初期,偏应力值随轴向应变的增加而缓慢线性增长近似为完全弹性阶段;第2阶段为应变硬化阶段,在轴向应变增加至2%~3%时,应力值急剧增加,曲线较陡,偏应力随轴向应变的增加而近似呈线性增长,这个阶段比较短,轴向应变均不超过4%;第3阶段为屈服阶段,偏应力随轴向应变的增加呈非线性缓慢增长,此时土体变形同时存在弹性变形与塑性变形,但随着应变量的继续增加,曲线倾斜的斜率渐渐变缓,其变形主要为塑性变形,当轴向应变达到15%时,此时的试样已处于破坏状态(图4)。

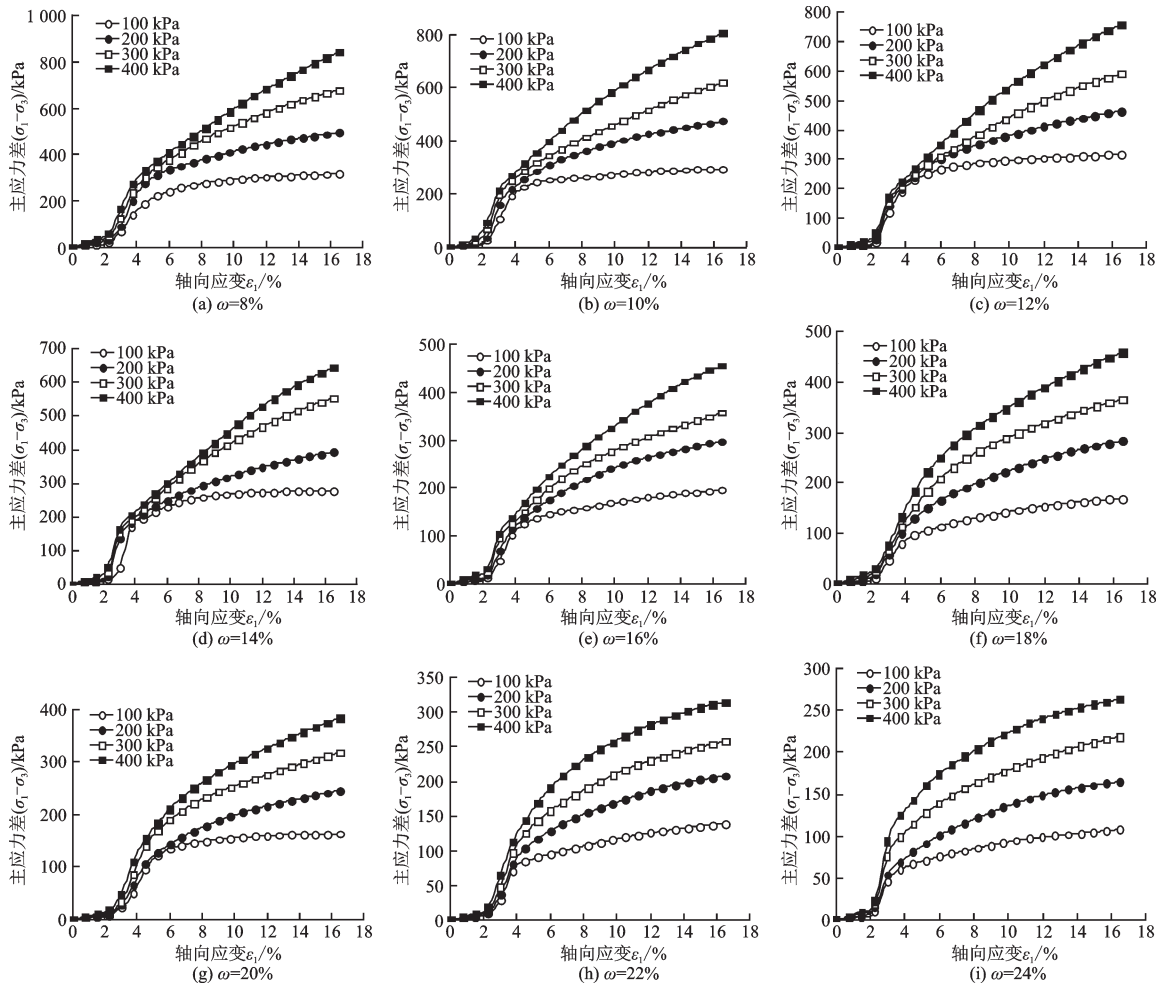


图3 不同含水率和围压条件下重塑紫色土的主应力差与轴向应变的关系曲线

Fig.3 Relationship between principal stress difference and axial strain of remolded purple soil under different water contents and confining pressures

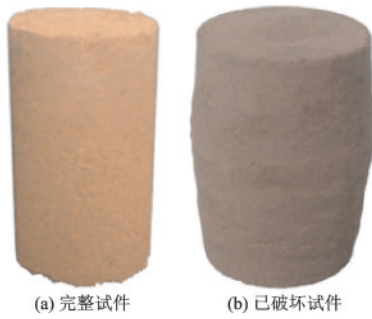


图4 三轴压实前后试样

Fig.4 Sample before and after triaxial compaction

2.1.1 不同含水率条件下紫色土的应力—应变特性

为直观表明紫色土在不同含水率下的应力—应变特性,本研究采用高斯插值法对含水率进行插值,设定含水率变化步长1%。并从插值中随机抽取两插值含水率通过试验验证其应力—应变曲线正确性。在围压 $\sigma_3=200$ kPa的条件下,土体主应力差(偏应力)随着不同含水率(8%、10%、12%、14%、16%、18%、20%、22%、24%)与轴向应变变化的三维关系曲面如图5所示。

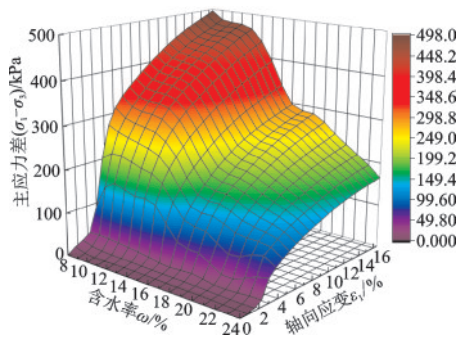


图5 不同含水率下主应力差与轴向应变的关系曲面

Fig.5 Relationship between principal stress difference and axial strain under different water contents

从图5可以看出,含水率 ω 对偏应力的影响规律较为明显,在围压一定时,随着含水率的增大,土体的偏应力随着含水率的升高而逐渐降低。当围压 $\sigma_3=200$ kPa,轴应变 $\epsilon_1=9\%$,土样含水率从8%增加至24%时,土体偏应力从397.97 kPa降低至128.36 kPa,下降幅度高达67.75%。此外,偏应力与轴向应变 $(\sigma_1-\sigma_3)-\epsilon_1$ 的关系曲线变得越来越平缓,呈显著下降趋势。这表明随着含水率增加,土体的抗剪强度削弱十分明显。

2.1.2 不同围压条件下紫色土的应力—应变特性

经对比发现,不同围压条件下紫色土的应力应变规律基本一致,以含水率 $\omega=12\%$ 为例进行分析,设定围压变化步长50 kPa,采用上述插值法进行插值得土体主应力差随着不同围压(100、200、300、400 kPa)与轴向应变变化的关系如图6所示。

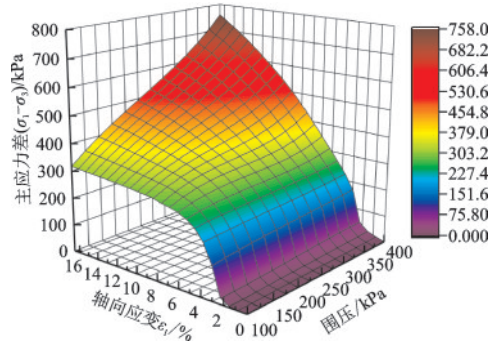


图6 不同围压下主应力差与轴向应变的关系曲面

Fig.6 Relationship between principal stress difference and axial strain under different confining pressures

从图6可知,围压的变化对土体的抗剪强度影响较为清晰,表现为随着围压的增加达到同一轴向变形的偏应力值越大。当含水率 $\omega=12\%$,轴应变 $\epsilon_1=10.5\%$,围压从100 kPa变化到400 kPa时,土体偏应力从299.49 kPa增加至564.97 kPa,上升幅度达88.64%。此时,偏应力 $\sigma_1-\sigma_3$ 与轴向应变 ϵ 关系曲线逐渐呈上升趋势,应力应变曲线由弱应变硬化型变化为强应变硬化型,这表明紫色土的抗剪强度随着围压升高而显著增强。

这是因为随着围压增大,围压给试样周围提供均匀的握裹力越大,土体侧向变形受到约束越大,导致紫色土土颗粒之间孔隙被压密、挤紧,土体颗粒间排列更为紧密,而土体在干密度不变的情况下,其孔隙比是一定值,空隙将越来越小,颗粒与颗粒之间的接触力增大,间接地提升了颗粒之间的摩阻力,所以土体能够承受更大的竖向荷载。

2.2 紫色土的破坏峰值

紫色土的破坏峰值即最大主应力差,重塑紫色土的最大主应力差与含水率之间的变化关系曲线如图7所示。

从图7可知,同一围压下,随着土体含水率的增加,其主应力差峰值随之降低,当围压 $\sigma_3=400$ kPa,含水率由8%增加至24%时,相应主应力差峰值迅

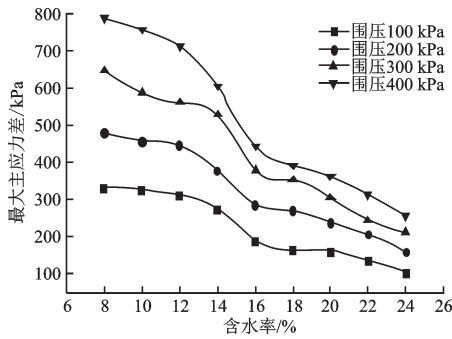


图7 含水率与最大主应力差之间关系

Fig.7 Relationship between water content and maximum principal stress difference

速地由 788.6 kPa 降至 257.3 kPa, 剪切峰值下降 67.37%。这表明, 在相同围压下, 随着含水率的增加, 土体所能够承受的竖向荷载越低, 土样更容易被破坏。这是因为试样含水率越大, 紫色土颗粒表面水膜就越厚, 起到了润滑的作用, 致使颗粒与颗粒之间的滑动摩擦力和咬合摩擦力(摩阻力)降低, 从而土体压缩性就越强; 此外, 紫色土颗粒在受压时越易受到水的作用而崩解、破碎, 从而强度进一步降低。

图 8 为最大主应力差与围压的关系曲线, 从图 8 可以看出, 含水率下的最大主应力差与围压均表现出较好的线性关系, 在含水率相同时, 主应力差峰值随着围压的升高而增大。以含水率为 8% 为例, 围压由 100 kPa 增加至 400 kPa, 相应主应力差峰值从 314.2 kPa 升高至 788.6 kPa, 剪切峰值增大 150.98%。但随着含水率的升高, 这种增大趋势逐渐减小。含水率为 8%、24%, 曲线的倾斜斜率分别为 1.58 和 0.5, 斜率值减少 1.08。这表明紫色土的主应力差峰值具有一定的水敏特性。

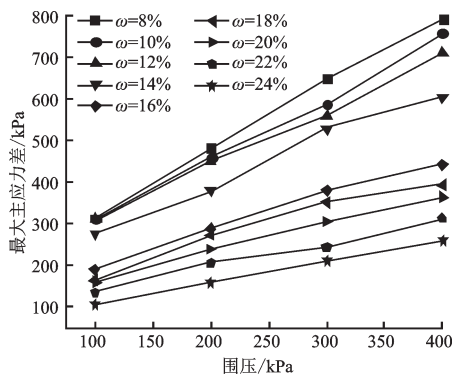


图8 最大主应力差与围压关系

Fig.8 Relationship between maximum principal stress difference and confining pressure

此外, 为了比较直观地说明不同含水率及围压条件下对紫色土抗剪强度的交互影响, 设定含水率变化步长为 1%, 围压变化步长 50 kPa, 采用上述插值法插值, 绘制不同围压条件下重塑紫色土含水率与最大主应力差的三维关系曲面(图 9)。

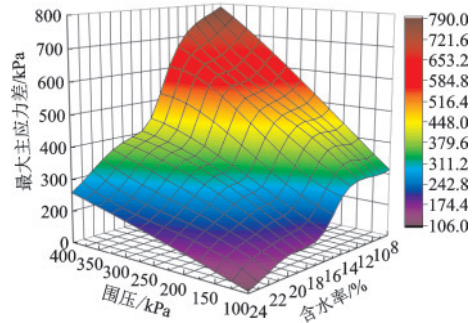


图9 不同含水率及围压下与最大主应力差的关系

Fig.9 Relationship between maximum water content, confining pressure and maximum principal stress difference

从图 9 可以清晰的看出, 随着围压降低及含水率的增加, 最大主应力差随之逐渐达到最小值。当含水率 ω 从 8% 增加至 24%, 围压 σ_3 从 400 kPa 减少至 100 kPa 时, 最大主应力差值从 788.6 kPa 降至 106.2 kPa, 下降幅度高达 86.53%。当含水率为 8%、24%, 围压分别从 100 kPa 增加至 400 kPa, 主应力差增长率均值达 134.37%; 当围压为 100 kPa、400 kPa 时, 含水率从 24% 下降至 8%, 相应主应力差的增长率均值达 201.68%。这表明围压和含水率的变化都对紫色土的抗剪强度有十分重要的影响, 且含水率对紫色土抗剪强度的影响略大于围压对其的影响。

2.3 紫色土强度特性

2.3.1 含水率对非饱和紫色土黏聚力的影响

图 10 给出了不同含水率下非饱和紫色土的黏聚力变化曲线, 从图中可以看出, 在整个 $c-\omega$ 曲线的变化过程中, 非饱和紫色土的黏聚力随含水率的增加呈现先增后减的趋势, 具有明显的峰值。 $c-\omega$ 关系曲线可分为 2 段, 第 1 段: 当 $8\% < \omega < 12\%$ 时, 黏聚力随着含水率增加而急剧上升。第 2 段: 当 $12\% < \omega < 24\%$ 时, 黏聚力随着含水率的增加而逐渐下降。以含水率 12% 作为界限含水率, 对紫色土黏聚力与含水率关系进行线性拟合可得式(3)、(4):

$$\text{含水率 } 8\% < \omega < 12\% \text{ 时 } (R^2=0.94)$$

$$C(\omega) = 6.91\omega - 21.80 \quad (3)$$

含水率 $12\% < \omega < 24\%$ 时 ($R^2 = 0.96$)

$$C(\omega) = -2.7459\omega + 90.188 \quad (4)$$

式中, $C(\omega)$ 为黏聚力 (kPa)。

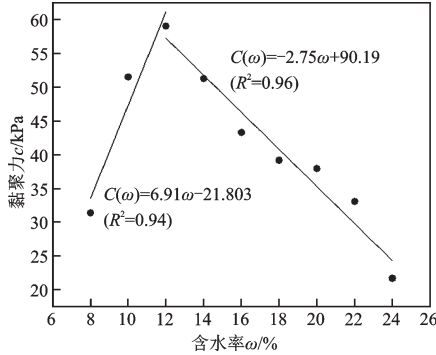


图 10 含水率与黏聚力的关系

Fig.10 Relationship between water content and cohesion

同时,为表明黏聚力临界值的出现并非由试验误差所致,本文对临界含水率 12% 的临近含水率 11%、13% 进行三轴试验,得其摩尔强度包络图如图 11 所示。从图中可知,11% 和 13% 紫色土的黏聚力分别为 54.68、54.49 kPa,均与紫色土黏聚力与含水率关系式(3)、(4)规律基本一致。因此可得黏聚力界限值的出现是土体真实存在的试验现象。

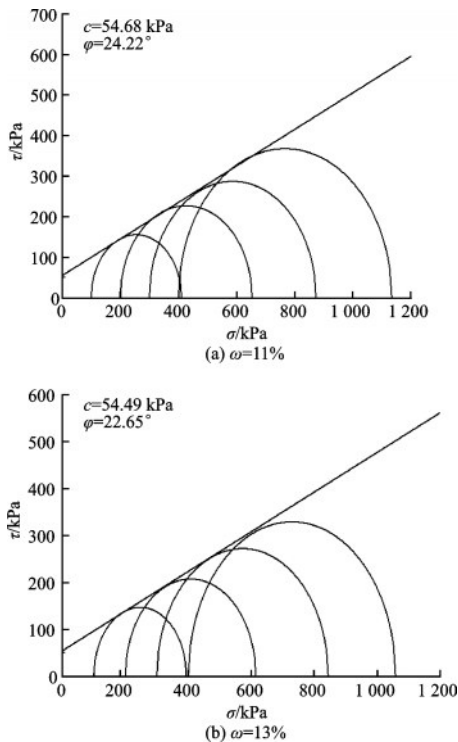


图 11 紫色土试样的摩尔强度包络线

Fig.11 The Mohr strength envelope of purple soil samples

2.3.2 含水率对非饱和紫色土内摩擦角的影响

非饱和紫色土内摩擦角 φ 与含水率 ω 变化的关系曲线如图 12 所示。

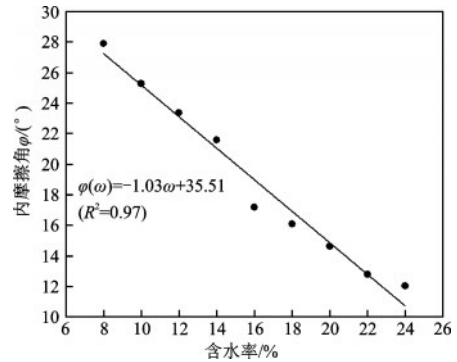


图 12 含水率与内摩擦角的关系

Fig.12 Relationship between water content and internal friction angle

从图 12 中可以看出,含水率的变化对土体的内摩擦角的影响较为明显,含水率为 8% 时,内摩擦角最大为 27.90°,含水率为 24%,内摩擦角最小为 12.03°,内摩擦角下降 56.88%。紫色土内摩擦角随着含水率的增加而逐渐减小,两者近似呈线性负相关。通过分析对非饱和紫色土含水率与内摩擦角关系进行线性回归可得公式:

$$\varphi(\omega) = -1.0328\omega + 35.508 \quad (5)$$

式中, $\varphi(\omega)$ 为内摩擦角(°)。

2.3.3 扩展莫尔-库伦准则破坏包面

扩展莫尔-库伦准则三维应力空间破坏包面如图 13 所示。

从图 13 可以看出,整个非饱和紫色土的莫尔-库伦准则破坏包面并非一个平面,土体任意平面(破坏面)上的抗剪强度与该面上法向应力关系曲线即 $\sigma-\tau$ 曲线的斜率随着含水率的增加而逐渐减小,破坏包面表现为随含水率的增加而逐渐变缓,当含水率从 8% 升高至 24% 时,曲线倾斜斜率从 0.53 降低至 0.21,斜率值减少 60.38%。

2.4 紫色土的有效应力路径

在剪切过程中试样的应力状态变化过程可用土体某一个特定平面上的应力变化移动轨迹即应力路径来表示。从不同含水率试样中选取临界含水率 $\omega = 12\%$ 的试样进行分析。该试样的有效应力路径 ($p'-q$) 如图 14 所示,图中 $p' = (\sigma_1 + \sigma_3)/2 - u$, $q = (\sigma_1 - \sigma_3)/2$ 。从图 14 中可以看出试样在剪切的

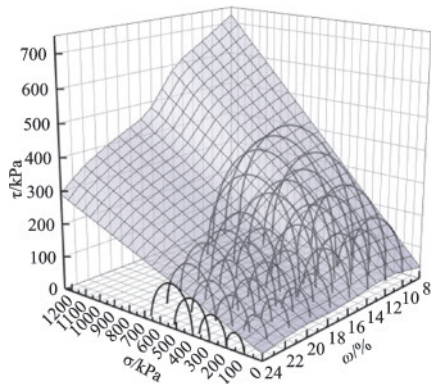


图13 扩展莫尔-库伦准则三维应力空间破坏包面

Fig.13 Three dimensional stress space failure surface of extended Mohr-Coulomb criterion

过程中其有效应力路径具有明显的相似性。在剪切的初始阶段,应力路径近似呈直线状,随着剪切过程的进行,应力路径逐渐弯曲,空隙压力逐渐增大,当轴向应变不断增大到15%以上时,试样发生塑性破坏,空隙压力达到最大值。

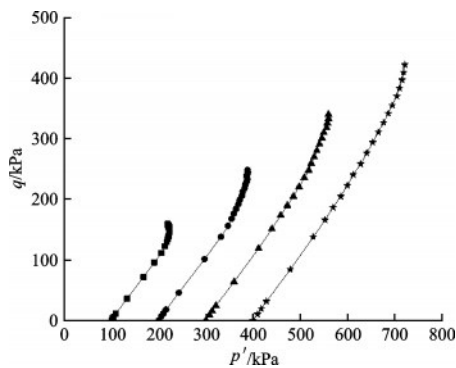


图14 $\omega=12\%$ 有效应力路径

Fig.14 Effective stress path diagram

3 讨论

3.1 紫色土高边坡侵蚀的主因

三峡库区紫色土高边坡广泛存在,边坡受到降雨、库水位变动等因素的侵蚀也十分普遍。文中研究发现库区边坡紫色土抗剪强度具有明显的水敏性。黏聚力随含水率的增加呈现先增后减的趋势,具有明显的峰值,当含水率由8%增加至12%,土体的黏聚力由31.38 kPa增加至59.02 kPa,含水率由12%增加至24%时,黏聚力由59.02 kPa降低至21.68 kPa;而内摩擦角随着含水率增加而逐渐减小,当含水率由8%增加至24%时,内摩擦角从

27.9°降低至12.03°,两者近似呈线性负相关。可以看出土体含水率的变化对土体黏聚力和内摩擦角两者都有较大的影响。通过文中含水率及围压变化对最大主应力差影响程度的分析,可以得知围压和含水率的变化都对紫色土的抗剪强度有重要影响,但是含水率对紫色土抗剪强度的影响略大于围压对其影响。因此可以认为,紫色土边坡发生侵蚀或者失稳,含水率改变是主要因素,其次才是围压。

3.2 含水率对紫色土矿物结构的影响

紫色土的矿物成分主要为蒙脱石、伊利石、斜长石、石英、绿泥石等,化学成分主要是 SiO_2 、 Fe_2O_3 和少量的 K_2O 、 CaCO_3 、 MgO 等。在电镜下,紫色土的胶结微结构主要是孔隙充填式或小块状,另有少量粒状接触和块状胶结结构。赵景波等^[14]研究发现其中约占10%左右的 Fe_2O_3 化学胶结物随着含水率的增加,被逐渐溶蚀而丧失黏聚力,这是造成紫色土颗粒在受压时容易受到水的作用而崩解、破碎的原因之一^[15]。而紫色土中矿物成分蒙脱石含量一般大于7%,属于膨胀性土壤^[16],因此,多数紫色土为弱膨胀土,少数为中等膨胀土。在含水率增大情况下膨胀变形是它们易于受到物理风化破碎和易于受侵蚀的主要原因。

3.3 含水率对紫色土强度特性的影响

除了上述土壤矿物类型外,陈红星等^[17]研究发现土的黏聚力是土壤颗粒间引力和斥力综合作用的结果,其黏聚力是库仑力、范德华力、胶结作用力、渗透压力,水膜黏结力的合力,是综合作用的结果。上述已表明紫色微观结构存在较多小块状或孔隙充填式胶结微结构,少量粒状接触和块状胶结结构。综合上述讨论,不难发现水膜联结和胶结作用对黏聚力的影响较大。

含水率较低时紫色土颗粒间引力较强,以长程范德华引力为主,尽管土粒外侧结合水膜中分子间引力较大,但由于水分子数量较少,颗粒间吸引力并不大;含水率逐渐增大后,颗粒间的吸引力也逐渐增强。这就是高边坡紫色土在含水率低于12%时,黏聚力随着含水率增大而增大的主因。含水率超过12%后,紫色土颗粒表面水膜加厚,起到了润滑的作用,孔隙水压力导致有效应力降低,范德华力逐渐变为颗粒间的静电排斥力。

随着试样含水率升高土体的孔隙水增多,颗粒

表面结合水膜变厚,离子水合斥力及分解作用增大,致使颗粒与颗粒之间的滑动摩擦力和咬合摩擦力(摩阻力)降低,从而使得土体内摩擦角降低。

4 结 论

以不同含水率和围压为变量条件,通过三轴固结不排水试验,分析三峡库区万州某高边坡饱和和紫色土的应力—应变曲线变化关系特性,以及对紫色土剪切破坏时的强度参数及硬化特性随含水率的变化关系进行研究,得出以下结论:

(1)在不同的含水率及围压条件下,土体应力—应变关系曲线均呈现出“持续硬化”甚至“加速硬化”现象。其应力—应变关系曲线经历了3个阶段:轴向应变0%~2.3%为弹性阶段,2.3%~4%为应变硬化阶段,4%后逐渐变为屈服阶段。

(2)在同一围压下,随着土体含水率的增加,应力—应变关系曲线呈明显的下降趋势;其主应力差峰值随之降低,其峰值下降幅度最大可达67.37%。不同含水率下的最大主应力差与围压均表现出较好的线性关系。

(3)在给定含水率下,随着围压的增加,应力—应变曲线由弱应变硬化型转变为强应变硬化型;主应力差峰值明显增大,其峰值增大幅度最大可达150.98%,但随着含水率的升高,这种增大趋势逐渐减小,且围压对紫色土抗剪强度影响程度约为含水率对其影响程度的66.63%。

(4)含水率对紫色土黏聚力及内摩擦角影响都较为明显。随着含水率的增加,土壤的内聚力先增加后减小,峰值处的含水率为12%;而土壤的内摩擦角随含水率的增加呈现一阶线性减小,且下降程度最大可达56.88%。

(5)土体任意平面(破坏面)上的抗剪强度与该面上法向应力关系曲线即 $\sigma-\tau$ 曲线的斜率随着含水率的增加而逐渐减小,破坏包面表现为随含水率的增加而逐渐变缓。

三峡库区紫色土高边坡的侵蚀和失稳,含水率是一个重要的参考指标,文中研究结果能为边坡治理工程提供理论支撑。

参考文献:

[1] 张洪,傅瓦利,袁红,等.三峡库区土地利用与土壤质量演化的关系研究——以重庆万州为例[J].西南

农业大学学报(自然科学版),2006,12(2):240-243.

Zhang H, Fu W L, Yuan H, et al. Relationship between land use and soil quality evolution in the Three-gorges reservoir area——A case study of Wanzhou Chongqing[J]. Journal of Southwest Agricultural University (Natural Science), 2006, 12(2): 240-243. (in Chinese)

[2] 李博,唐世浩.基于TRMM卫星资料分析三峡蓄水前后的局地降水变化[J].长江流域资源与环境,2014,23(5):617-625.

Li B, Tang Sh H. Local precipitation changes induced by the Three gorges reservoir based on trmm observations[J]. Resources & Environment in the Yangtze Basin, 2014, 23(5):617-625. (in Chinese)

[3] 胡海军,魏丽敏,冷伍明.黏土强度指标的测定和选取[J].岩土力学,2007,21(12):2698-2704.

Hu H J, Wei L M, Leng W M. Determination and choice of strength index of clay[J]. Rock & Soil Mechanics, 2007, 21(12):2698-2704. (in Chinese)

[4] 张宁宁,骆亚生,沙磊.含水率对非饱和原状黄土强度的影响[J].水土保持通报,2013,33(5):101-104.

Zhang N N, Luo Y Sh, Sha L. Effect of water content on strength of undisturbed unsaturated loess[J]. Bulletin of Soil & Water Conservation, 2013, 33(5): 101-104. (in Chinese)

[5] 王海东,高昌德,刘方成.含水率对非饱和砂土力学特性影响的试验研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2015,42(1):90-96.

Wang H D, Gao Ch D, Liu F Ch. Experimental study of the influence of water content on the mechanical characteristics of unsaturated sandy soil[J]. Journal of Hunan University, 2015, 42(1):90-96. (in Chinese)

[6] 黄斌,傅旭东,谭凡,等.含水率对滑带土强度及变形影响试验研究[J].岩土力学,2012,33(9):2613-2618.

Huang B, Fu X D, Tan F, et al. Experimental study of relationship between water content and strength or deformation of slip soil[J]. Rock & Soil Mechanics, 2012, 33(9):2613-2618. (in Chinese)

[7] 黄琨,万军伟,陈刚,等.非饱和土的抗剪强度与含水率关系的试验研究[J].岩土力学,2012,33(9):2600-2604.

Huang K, Wan J W, Chen G, et al. Testing study of relationship between water content and shear strength of unsaturated soils[J]. Rock & Soil Mechanics, 2012, 33(9):2600-2604. (in Chinese)

[8] 王亮,谢健,张楠,等.含水率对重塑淤泥不排水强度性质的影响[J].岩土力学,2012,33(10):2973-

- 2 978.
- Wang L, Xie J, Zhang N, et al. Influences of water content on undrained shear strength of remolded dredged materials[J]. *Rock & Soil Mechanics*, 2012, 33(10):2 973-2 978.(in Chinese)
- [9] 胡斐南,魏朝富,许晨阳,等.紫色土区水稻土抗剪强度的水敏性特征[J].*农业工程学报*,2013,29(3):107-114.
- Hu F N, Wei Ch F, Xu Ch Y, et al. Water sensitivity of shear strength of purple paddy soils[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(3): 107-114.(in Chinese)
- [10] 倪九派,袁天泽,高明,等.土壤干密度和含水率对2种紫色土抗剪强度的影响[J].*水土保持学报*,2012,26(3):72-77.
- Ni J P, Yuan T Z, Gao M, et al. Effect of soil water content and dry density on soil shearing strength for calcareous purple soil and neutral purple soil[J]. *Journal of Soil & Water Conservation*, 2012, 26(3): 72-77. (in Chinese)
- [11] 王佳佳,殷坤龙,肖莉丽.基于GIS和信息量的滑坡灾害易发性评价——以三峡库区万州区为例[J].*岩石力学与工程学报*,2014,33(4):797-808.
- Wang J J, Yin K L, Xiao L L. Landslide susceptibility assessment based on GIS and weighted information value: A case study of Wanzhou district, Three gorges reservoir[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics & Engineering*, 2014, 33(4):797-808.(in Chinese)
- [12] 花可可,魏朝富,任镇江.土壤液限和抗剪强度特征值及其影响因素研究——基于紫色土区[J].*农机化研究*,2011,33(6):105-110.
- Hua K K, Wei Ch F, Ren Zh J. Characters and effects of soil liquid limit and shear strength in purple hilly-mountainous region[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2011,33(6):105-110.(in Chinese)
- [13] 土工试验规程:GBSL237—1999[S].北京:中国水利水电出版社,1999.
- Test methods of soils: GBSL237—1999[S]. Beijing: China Waterpower Press, 1999.(in Chinese)
- [14] Huang X, Huang Y H, Chen X Y, et al. Comparative study of soil erodibility and critical shear stress between loess and purple soils[J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 558: 625-631.
- [15] 赵景波,贺秀斌,邵天杰.重庆地区紫色土和紫色泥岩的物质组成与微结构研究[J].*土壤学报*,2012,49(2):212-219.
- Zhao J B, He X B, Shao T J. Material composition and microstructure of purple soil and purple mudstone in Chongqing area[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2012, 49(2):212-219.(in Chinese)
- [16] Al-Shayea N A. The combined effect of clay and moisture content on the behavior of remolded unsaturated soils[J]. *Engineering Geology*, 2001, 62(4):319-342.
- [17] 陈红星,李法虎,郝仕玲,等.土壤含水率与土壤碱度对土壤抗剪强度的影响[J].*农业工程学报*,2007,23(2):21-25.
- Chen H X, Li F H, Hao Sh L, et al. Effects of soil water content and soil sodicity on soil shearing strength [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*,2007,23(2):21-25.(in Chinese)
- [18] 胡 昕,洪宝宁,周宇泉,等.三轴压缩条件下黏性土微细结构随荷载变化动态调整的定量研究[J].*四川大学学报(工程科学版)*,2006,38(6):57-62.
- Hu X, Hong B N, Zhou Y Q, et al. Quantitative research on dynamic alignment of microstructure of cohesive soils following load fluctuation under triaxial compression [J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)* ,2006,38(6):57-62.(in Chinese)

(本文责编:池营营)