

非饱和花岗岩残积土的剪切特性与抗剪强度探讨

晏 权

(广东省地质局清远地质调查中心, 广东 清远 511500)

摘 要 非饱和花岗岩残积土的剪切特性直接影响边坡稳定性、地基承载力等工程问题。本文通过室内试验, 探讨不同含水率和围压条件下原状与重塑花岗岩残积土的剪切特性及抗剪强度变化规律, 以期为非饱和花岗岩残积土的工程应用提供理论依据, 从而提高边坡稳定分析的准确性, 为地基处理优化奠定坚实的基础。试验结果表明, 原状土黏聚力随含水率升高衰减达 86%, 且剪切破坏模式由剪切带向鼓胀破坏转变, 验证了 VG 模型对土水特征曲线的适用性。

关键词 非饱和花岗岩; 残积土; 剪切特性; 抗剪强度

中图分类号: TU4

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.13.042

0 引言

花岗岩残积土是由长时间风化作用形成的一种特殊土体, 由于其形成过程复杂, 结构松散, 且受含水率影响显著, 在降雨、地下水渗流等环境因素作用下易发生边坡失稳、地基沉降等工程问题。因此, 研究其剪切特性及抗剪强度演化规律, 对于预测滑坡风险、优化地基设计及提高土体工程稳定性具有重要意义。

1 试验方案设计

1.1 现场取样

本研究的试验土样选自某处正在进行削坡施工的边坡, 采样深度控制在 8~12 m 范围内。为保证样品的代表性, 取样过程中采用机械开挖与人工挑选相结合的方式, 对边坡剖面进行精细处理, 以尽量减少土体扰动^[1]。将原状土样切割成边长约 30 cm 的立方体, 并用保鲜膜和泡沫塑料紧密包裹, 以最大限度地减少水分散失, 同时防止结构破坏。此外, 在采样点周围收集大量扰动土, 以便进行后续物理力学性质的补充试验^[2]。

为了明确试验土样的特性, 根据《土工试验方法标准》进行物理指标测试。然后采用筛分法和激光粒度分析, 对颗粒级配进行测定。结果显示, 粒径小于 0.075 mm 的细颗粒约占 50.79%, 不均匀系数 (Cu) 73.53, 曲率系数 (Cc) 0.14, 低于 1。根据这些特征, 可判断该土体属于颗粒分布较为离散的细粒土。利用 X 射线衍射分析测试土体的矿物成分。结果表明, 该土的主要矿物成分以石英 (26%) 和高岭石 (40%) 为主, 表明该土样表现出较高的风化程度, 其中的长石和云母长期

受水解、氧化影响, 逐渐发生转化, 最终形成高岭石等次生矿物。通过化学成分分析可知, 该土样的主要构成包括 SiO_2 、 Al_2O_3 和 Fe_2O_3 。

1.2 试样制备

为确保试验过程中土样的可比性, 本研究分别制备原状土样和重塑土样, 以用于不同测试条件下的力学性质分析。

原状土的制备首先从采集的块状土样中选取尺寸略大于目标试样的部分, 避免在加工过程中因土体损耗导致尺寸不足^[3]。选定土块后, 将其放置在切土盘上, 使用钢丝锯进行精细切割。切割过程中, 缓慢转动土块, 逐步削去多余部分, 以确保最终试样尺寸均匀, 且避免因应力集中导致裂纹产生^[4]。为满足三轴试验的要求, 最终试样被削割成直径 39.1 mm、高 80 mm 的标准圆柱形试样。

重塑土的制备流程如下: 首先将扰动土样充分碾碎, 使其解体成较小颗粒, 然后通过 2 mm 筛网筛分, 以剔除较大颗粒, 确保颗粒级配均匀^[5]。然后结合原状土的干密度、含水率, 对于土质量和加水量进行计算。按照计算比例加入适量水分后, 充分搅拌, 使土样均匀湿润。搅拌后的土样用保鲜膜包裹, 静置 24 小时, 确保水分在土体内部充分扩散, 达到均衡分布状态。待土样水分均匀后, 使用液压机进行压制成型, 最终得到符合试验要求的水重塑土试样。整个制备过程中需严格控制土样的含水率和压实度, 尽量减少实验误差。

1.3 试验方法

本研究采用 USTX-2000 非饱和土动三轴试验系统,

对土样开展剪切试验,以探讨含水率对花岗岩残积土抗剪特性的影响。试验过程中分别对五种含水率条件(13.00%、16.00%、19.00%、23.00%和27.05%)的土样进行测试,并在不同围压条件下评估其抗剪强度及变形特性。

1. 试样处理与含水率控制。试验前,为保证不同含水率试样的制备精度,使其状态尽可能一致,所有试样均需经过真空饱和处理。具体方法是将制备好的试样置于真空饱和缸中进行抽真空,使试样尽可能排除内部气体,提高饱和度。完成饱和处理后,根据得出的干密度对含水率进行计算,并优化控制。如果含水率过高,可采用自然风干的方式进行处理,直至达到目标含水率。随后,用保鲜膜包裹处理后的试样,并放入保湿缸中 24 h,减少试验误差。

2. 试验加载与控制参数。根据试样的埋深条件,三轴试验的固结围压分别设定为 100 kPa、200 kPa 和 300 kPa,以模拟不同围压环境下的土体力学响应。固结过程的判定标准是 10 min 内的试样体积改变在 5 mm^3 以下。剪切试验可应用应变控制方式进行加载,加载速率设定为 0.08 mm/min ,以保持土体的变形速率稳定。试验终止条件为轴向应变达到 20%,此时记录试样的抗剪强度及变形情况。

3. 试验设备安装与操作。为确保试验顺利进行,试样安装前需对围压系统及反压管道中的气泡进行排除,防止气体残留影响试验结果。所有传感器在试验前需进行零点校准,以减少测试误差。试样安装过程中,依次完成试样放置、加载杆连接、压力室罩安装等步骤,并检查各连接部位的密封性,防止试验过程中因泄漏导致含水率变化。在固结过程中,为防止试样含水量发生非预期变化,反压设定为 0,使试样在固结期间保持稳定的含水状态。待固结完成后,在剪切开始前,关闭反压阀门,确保测试过程中试样含水率不受额外影响。

2 试验结果分析

2.1 原状土剪切变形特性

在不同围压条件下,对原状花岗岩残积土试样进行剪切加载后,其破坏形态随含水率和围压的变化表现出一定规律性。

试验结果表明,除含水率较低(13.00%)且围压较小(100 kPa)的试样出现明显剪切带外,其余试样均表现为鼓胀破坏特征,即试样中部膨胀、两端收缩,且破坏面较多。变形模式的产生主要与花岗岩残积土的结构特性密切相关。由于其强度主要依赖游离氧化铁的胶结作用及母岩的残余结构,其整体结构性较一般黏性土弱,因此在受力过程中容易发生形态变化。

在低含水率和低围压条件下,颗粒间仍存在一定的胶结作用,使得土体初始结构具有较高的抗剪能力。在加载初期,土颗粒之间的联系较为紧密,但随着偏应力持续增加,颗粒联结逐渐削弱,并最终形成局部的软弱带,进而演化为明显的剪切带。而当含水率和围压增大时,土颗粒之间的胶结作用进一步降低,颗粒更容易发生重新排列,导致土体整体以压密变形为主,破坏形式趋向于鼓胀模式,且破坏面增多,呈现较为分散的破坏特征。由此表明,在较高含水率和围压条件下,花岗岩残积土的变形机理更倾向于塑性变形,而非脆性破坏。

2.2 重塑土剪切变形特性

由于重塑花岗岩残积土在制样过程中经历碾散、筛分及重新压制,其颗粒间的天然胶结作用几乎完全丧失,导致其内部结构特性显著弱化。因此,在相同围压和含水率条件下,重塑土的抗剪强度明显低于原状土。在剪切变形过程中,重塑土的颗粒主要依靠相互摩擦承受外部荷载,而非依赖颗粒间的胶结力,因此应力—应变曲线普遍呈现硬化型特征,具体如图 1 所示。

在剪切过程中,重塑土的孔隙水压随变形的发展呈现出不同的趋势。在围压较低(100 kPa)时,只有含水率 19.00% 的试样未发生明显波动,其他试验的水压从呈现先升后降的趋势,含水率 13.00% 的试样后期时又出现负水压大情况可见,试验出现了先缩后胀的情况。而在围压较高的条件下,高含水率(23.00% 及 27.05%)的试样表现出先上升后下降的孔隙水压力变化趋势,并在 10% 左右的应变阶段后出现剪胀现象。而对于其他试样,尤其是围压为 300 kPa 的低含水率试样,孔隙水压力则持续上升,表现为剪缩趋势。

2.3 抗剪强度指标

花岗岩残积土的抗剪强度指标可根据摩尔—库仑强度准则计算,包括总抗剪强度指标和有效抗剪强度指标。不同含水率条件下,原状土与重塑土的抗剪强度随水分变化呈现出一定规律。在相同含水率条件下,原状土的抗剪强度明显高于重塑土,表明原状土因母岩残余结构和胶结作用的影响,使其整体强度保持较高水平。随着含水率提升,原状土、重塑土的黏聚力均呈现显著下降的趋势,且减小幅度较大。尤其是在含水率上升到饱和状态的过程中,原状土的黏聚力减少约 86%,而重塑土下降 91%。但内摩擦角整体波动不大,并未出现明显降低。表明在高含水率条件下,土体强度的衰减主要归因于颗粒胶结作用的减弱,而颗粒间的摩擦力则相对稳定,对土体整体抗剪能力的贡献变化不大。

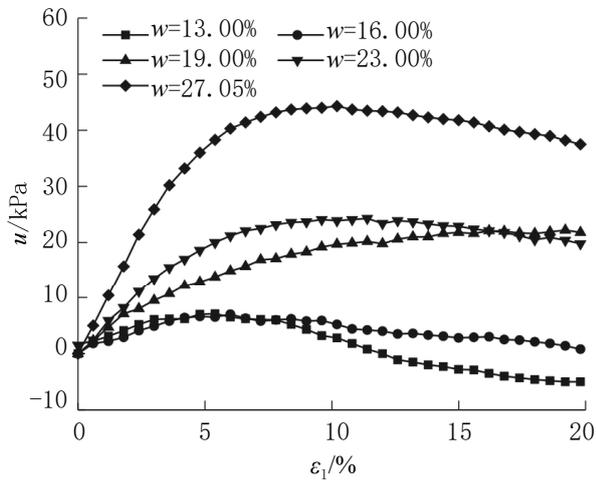
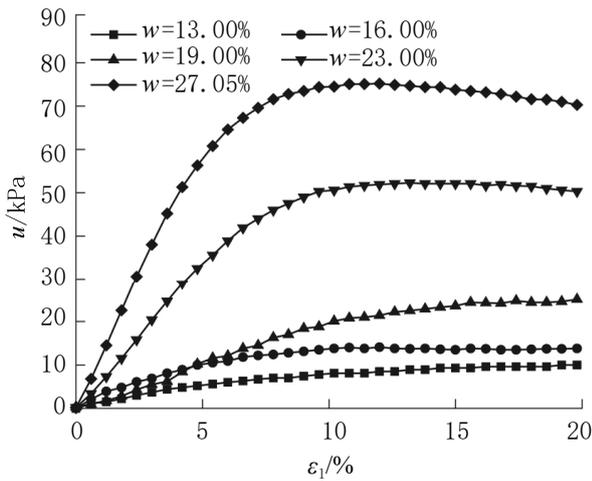
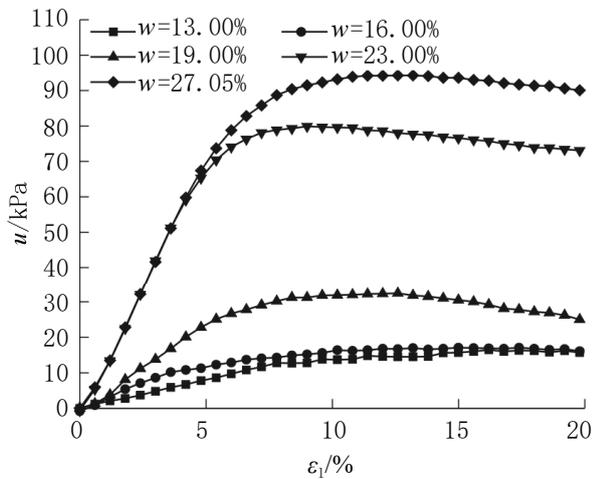
(a) $\sigma_3=100$ kPa(b) $\sigma_3=200$ kPa(c) $\sigma_3=300$ kPa

图1 试样的孔隙水压与应变关系

2.4 非饱和抗剪强度

土水特征曲线的测试采用压力板仪进行测定,并结合VG模型进行数据拟合,以获取不同含水率下土体对应的基质吸力。

结果表明,基质吸力对土体内摩擦角的影响较小,而对黏聚力的影响较为显著。随着基质吸力增加,土体颗粒之间的联结作用增强,使得黏聚力呈上升趋势。然而,这种增长并非线性,而是随着基质吸力的提升逐渐趋缓,表明当吸力达到一定程度后,其对土体强度的提升作用有限。由此说明,在低含水率条件下,基质吸力是维持土体稳定性的重要因素,但当土体接近饱和状态时,基质吸力的贡献显著减弱,导致抗剪强度下降。

3 结论

研究表明,花岗岩残积土的应力—应变特性会随着含水率提升及围压增加而变化,表现出明显的硬化特征。然而,两者在低围压和低含水率条件下的表现有所不同,原状土在此情况下呈现出一定的软化趋势,而重塑土由于强度比原状土低,始终较为硬化。在应力路径的变化趋势方面,两类土体中基本保持一致,在较低围压下,均经历了剪缩后剪胀的情况,而当含水率趋于饱和状态时,孔隙水压力也会逐步增加,使得有效应力与总应力之间的路径出现越发偏离的情况,进而影响到土体的抗剪特性。在土水特征方面,VG模型的应用可以很好地描述土样的特征曲线,结果显示,原状土的残余吸力相较于重塑土更高,脱湿时会使得原状土有更广阔的过渡范围,说明其结构更稳定,含水率的变化过程较为缓慢。在高饱和度阶段,基质吸力对两种土样的影响较小,直到进气值达到一定水平后,含水率才迅速下降,并最终趋于稳定,表现为残余状态。

参考文献:

- [1] 尚召伟,孔令伟,鄢俊彪,等.非饱和花岗岩残积土的小应变剪切模量特性与其持水特征曲线确定方法[J].岩土力学,2025(04):1-10.
- [2] 马勤国,郭皓公,罗晓晓.非饱和花岗岩残积土的剪切特性与抗剪强度分析[J].华南理工大学学报(自然科学版),2024,52(11):55-68.
- [3] 胡华,吴毅峰.渗流条件下花岗岩残积土渗流-剪切变形试验研究[J].福建建材,2024(09):1-4.
- [4] 钟祎琦.花岗岩残积土渗流侵蚀及其对土体稳定性的影响研究[D].武汉:华中农业大学,2024.
- [5] 林学东.MICP技术改良花岗岩残积土非饱和强度及渗透特性试验研究[D].南昌:南昌大学,2024.