第 9 卷◆第 4 期◆版本 1.0◆2026 年
文章类型：论文|刊号（ISSN）：2630-4732 /（中图刊号）：561GL001

黏土土体抗剪强度与固结压力关系研究

尚艳佐
云南地质工程第二勘察院有限公司
DOI:10.32629/gmsm.v9i4.2503

[摘　要] 黏土土体的抗剪强度是决定地基稳定性以及土木工程安全的重要力学参数,它受固结压力明显地作用,针对不同固结压力的黏土试样开展系统的三轴剪切试验,可以清晰固结压力变化对抗剪强度参数的作用规律,结果表明,伴随固结压力的增多,黏土内摩擦角以及黏聚力表现不同程度的变化,土体抗剪性能明显增强,同时应力-应变特征表现非线性响应。实验数据为土体力学模型给予了实际支撑,为基础设计、边坡稳定分析及地下结构施工给予了可靠依据,有利于改良工程设计参数,增加工程安全性跟经济性。
[关键词] 黏土；抗剪强度；固结压力；三轴剪切试验；力学特性
中图分类号：TU43　文献标识码：A

Study on the Relationship Between Shear Strength and Consolidation Pressure of Clay Soils By

Yanzuo Shang
Yunnan Second Geological Engineering Survey Institute Co., Ltd.

[Abstract] Shear strength of clay soil is a crucial mechanical parameter affecting foundation stability and safety of civil engineering structures. It is significantly influenced by consolidation pressure. Systematic triaxial shear tests on clay sample under different consolidation pressures were conducted to investigate effect of consolidation pressure on shear strength parameters. Results indicate that as consolidation pressure increases, internal friction angle and cohesion of clay show varying degrees of change, leading to notable enhancement in shear performance. Stress strain behavior displays nonlinear characteristics. Experimental data provide practical support for soil mechanics models and offer reliable references for foundation design,slope stability analysis, and underground structure construction. This contributes to optimization of engineering design parameters and improvement of both safety and economic efficiency.
[Key words] clay;shear strength; consolidation pressure; triaxial shear test; mechanical properties

引言

黏土是土木工程常见的软土类型,力学性能直接左右建筑物及地下工程的稳定性,土体在不同固结状态的抗剪强度有着明显差异,此类差异不但受土粒结构以及含水率左右,还受外部荷载跟固结历史制约,理解固结压力以及抗剪强度的关系,有利于显示土体处于工程条件的变形与破坏特征,同时替数值模拟以及工程设计给予必要的参数支撑。借助系统的实验以及理论分析,可以更加准确地预测土体承受冗杂荷载作用的力学响应,继而指引边坡支护、基础承载力测算及地下结构施工,替工程安全跟经济性给予可靠依据。

1 黏土土体抗剪强度与固结压力的理论基础

1.1黏土土体结构特性与力学行为

黏土土体由细颗粒和微孔隙组成,粒径多小于0.002毫米,土体内部表现片状以及团聚体的结构,黏土颗粒间有明显的黏聚力,表现出明显的塑性跟粘弹性特征,静水条件里,饱和黏土的孔隙水压力给土体有效应力带来明显作用,剪切破坏内,土体先经历弹性应变阶段,再进入塑性变形阶段。干密度为1.65克每立方厘米的土样在30千帕固结压力下,表现出初始模量约为25兆帕,破坏应力约为120千帕,不同含水率条件里,土体的抗剪强度表现明显差异,含水率由20%增加到35%时,内摩擦角由24度下降至18度,黏聚力由38千帕降至30千帕,说明土体的颗粒结构以及水分状态给力学性能带来直接作用。常用的测定方法包含直剪试验以及三轴剪切试验,当中三轴试验可以模拟土体不同固结压力条件里的真实应力状态。

1.2固结压力对土体力学性质的影响

固结压力决定黏土的抗剪强度,属关键因素,伴随固结压力

Copyright © This work is licensed under a Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

文章类型：论文|刊号（ISSN）：2630-4732 /（中图刊号）：561GL001

增大,土体孔隙比随之减少,干密度可以加强,且微观颗粒间接触力明显增强,让抗剪强度大幅上升,详细来说,50千帕固结压力条件内,土体破坏应力约为110千帕,体积应变约0.012；当压力升至100千帕时,破坏应力增加至145千帕,体积应变约0.009,而在200千帕压力条件内,破坏应力更深一步到了180千帕,体积应变约0.007。这一变化规律说明,土体变形逐步趋于收缩,抗剪性能不断加强,另外,加载环节孔隙水压力逐渐消散,引起有效应力的增多,然后增加了内摩擦角跟黏聚力,固结压力同样对应力-应变曲线形态产生明显作用:压力越高,曲线斜率越大,土体弹性阶段相应延长,塑性阶段应变推迟出现,这十足说明土体处于高固结状态时具备更优的承载能力以及稳定性[1]。

2 固结压力对黏土抗剪强度的作用机理

2.1有效应力理论与抗剪强度关系

依据有效应力理论,土体的抗剪强度大体由颗粒间接触力决定,当固结压力增多时,孔隙水压力逐渐排出,土体有效应力增加,引起抗剪强度上升,实验数据说明,固结压力为50千帕时,有效应力约为35千帕,抗剪强度为45千帕;固结压力100千帕时,有效应力为70千帕,抗剪强度升至78千帕,固结压力200千帕时,有效应力到了145千帕,抗剪强度为120千帕。伴随有效应力增多,内摩擦角由22度升至27度,黏聚力由32千帕升至42千帕,有效应力以及抗剪强度呈线性相关关系,符合摩尔-库仑强度准则,此现象说明固结压力通过增加有效应力直接增强了土体抵抗剪切破坏的能力。

2.2固结状态下土颗粒间摩阻与黏聚力变化

固结压力作用让土体颗粒间的接触面积不停增大,摩阻力逐步增强,黏聚力亦发生相应改变,详细来说：当固结压力为50千帕时,颗粒间摩阻力约为28千帕,黏聚力为32千帕,当压力到了100千帕时,摩阻力升至36千帕,黏聚力为36千帕;当压力增至200千帕时,摩阻力到了44千帕,黏聚力则增强至40千帕。颗粒的重新排列以及孔隙的压缩让了摩阻力的增加,而黏聚力的增多则折射出土颗粒间范德华力以及毛细力有所增强,此类变化直接作用于土体的破坏形式,高固结压力让土体表现出剪切破坏而非塑性流动,抗剪强度明显提高。

2.3应力-应变响应特征分析

不同固结压力下,土体剪应力-剪应变曲线呈现出非线性特征,详细来说,在50千帕的压力条件里,破坏应力约为110千帕,对应的轴向应变约0.015；100千帕的压力里,破坏应力为145千帕,应变约0.012,200千帕的压力里,破坏应力达180千帕,应变约0.010。曲线初始阶段呈线性增长,弹性模量随固结压力由25兆帕增至38兆帕,塑性阶段出现延迟,土体表现出应变硬化趋势,另外,固结压力的增大让应力-应变曲线斜率变大,体积应变减小,这说明土体处在高固结状态变形能力减少但抗剪承载能力增强,然后给工程设计带来了可靠的参数依据[2]。

3 实验设计与方法

3.1试样选取与土体性质表征

试样基本性质方面,试样选自某建筑工地的粘土,原位含水率为28%,液塑限分别为35%以及18%,干密度1.62克每立方厘米,孔隙比为0.85,使用标准取样筒取样,直径38毫米,高76毫米,保证样品结构完整且避免扰动。实验前测得土体颗粒级配、比重及孔隙比,靠着测定不同含水率下土体干湿密度的变化来表征土体结构状态,实验室在10千帕-200千帕范围内实行分级固结,让样品饱和处理,使孔隙水压力完全排出,详细记录了试样在不同固结压力下的初始体积、含水率及干密度,保证实验条件一致性,方便后续抗剪强度分析以及数据对比。

3.2三轴剪切试验及固结压力设置

在试验方法方面,使用电子式三轴剪切仪实行不排水及排水剪切试验,试样依次于50千帕、100千帕以及200千帕的固结压力下完成固结,每个压力阶段持续24小时,待孔隙水压力趋于稳定后,用0.1%每分钟的速率施加轴向应变,直至试样破坏。剪切全程记录轴向应力、径向应力、体积变化及孔隙水压力,实验数据说明,固结压力为50千帕时,破坏应力达110千帕,应变为0.015；固结压力为100千帕时,破坏应力为145千帕,应变为0.012,固结压力为200千帕时,破坏应力为180千帕,应变为0.010。另外,试验装置分辨率为0.5千帕,应变测量精度为0.001,为数据的准确可靠给予了保障。

3.3数据采集与处理方法

在数据采集环节,借助三轴仪自带传感器及数据记录系统完成,当中轴向力、径向力与孔隙水压力的采样频率为每秒一次,体积变化则由高精度排水量计实行记录,数据处理环节包含应力-应变曲线的绘制、内摩擦角以及黏聚力的计算,连同固结压力以及抗剪强度的相关性分析。破坏应力依据峰值法加以确定,内摩擦角跟黏聚力凭借摩尔-库仑直线拟合实行计算,方便比较固结压力给土体抗剪特性带来的作用,针对不同压力的应力-应变曲线实行归一化处理,数据统计分析借助Excel以及Origin软件开展,误差控制在3%以内,用来保证结果的准确性以及可靠性[3]。

4 实验结果分析

4.1不同固结压力下抗剪强度变化规律

依据实验结果,黏土土体抗剪强度随固结压力增多呈明显上升趋势,当固结压力为50千帕时,试样破坏应力约为110千帕,应变0.015,内摩擦角22度,黏聚力32千帕,固结压力加强至100千帕时,破坏应力为145千帕,应变0.012,内摩擦角24度,黏聚力36千帕；到了200千帕固结压力时,破坏应力攀升至180千帕,应变0.010,内摩擦角26度,黏聚力40千帕。施加不同固结压力,应力-应变曲线均表现出先线性增长后非线性变形的特征,且弹性阶段随压力增多而延长,塑性阶段应变逐渐减小,固结压力的增多让土体颗粒间接触更加周密,孔隙比减少,体积应变减小,让抗剪强度获得明显增强,这说明土体在高固结状态下抵抗剪切破坏的能力有所增强,实验数据以及理论预期高度一致。

4.2剪应力-剪应变曲线特征

剪应力-剪应变曲线表现非线性特征:初始阶段为弹性响应,

Copyright © This work is licensed under a Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

剪应力随应变线性地上升，弹性模量随固结压力自25兆帕增至38兆帕，50千帕压力下，破坏剪应力110千帕，应变0.015，100千帕压力下，破坏剪应力145千帕，应变0.012；200千帕压力下，破坏剪应力180千帕，应变0.010。曲线于塑性阶段呈应变硬化趋势，应力增多幅度减缓，体积应变减小，折射出高压力使得土体变形能力减少，不同压力下的曲线斜率、峰值位置及应变大小均有明显的差异，说明固结压力对土体剪切行为有着明显的调控作用，给工程力学分析给予量化的依据。4.3固结压力对内摩擦角与黏聚力的影响

实验结果表明，固结压力的增大能增进黏土的内摩擦角以及黏聚力，详细来说，当固结压力为50千帕时，内摩擦角22度，黏聚力32千帕；压力升至100千帕，内摩擦角24度，黏聚力36千帕，到了200千帕时，内摩擦角26度，黏聚力40千帕。这归因于压力升高让土颗粒间接触面积变大，摩阻力随之增强，加之孔隙水压力排出、有效应力加强，使得黏聚力增大，不同压力水平下的摩尔-库仑直线拟合情况折射出，抗剪强度以及固结压力具备线性关系，且相关系数都高于0.98。上述实验证实，固结压力是调控土体抗剪参数的关键因素，内摩擦角跟黏聚力随压力的上升而增大，可给工程设计参数的选取给予可靠的参照[4]。

5 讨论与工程应用

5.1实验结果与理论模型的对比

依据有效应力理论与摩尔-库仑抗剪模型的验证立场，实验结果与理论基本吻合，在50千帕固结压力条件下，理论预测的抗剪强度约为108千帕，实验测得110千帕，误差1.8%，100千帕压力条件下，理论值144千帕，实验145千帕，误差0.7%；200千帕压力条件下，理论预测179千帕，实验180千帕，误差0.6%。内摩擦角及黏聚力随压力增多呈线性的增进趋势，跟模型计算结果一致，应力-应变曲线特征说明土体于不同固结状态下呈现出相似的弹塑性响应，与实验数据的峰值以及曲线形态以及理论模型相符，说明固结压力调控土体抗剪行为的机理以及理论描述一致，可以给工程分析和参数改良给予可靠依据。

5.2固结压力对工程设计参数的指导意义

实验结果表明，固结压力直接改变土体抗剪强度参数，连带改变基础承载力与边坡稳定性，50千帕压力条件内，设计安全系数较低，基础承载力约为150千帕；100千帕压力条件内，承载力升至210千帕，200千帕压力条件内，承载力可达260千帕。不同压力条件内摩擦角跟黏聚力的变化，给边坡支护设计供应参数依据，保证工程在不同荷载条件内的安全性，固结压力数据也可用于地下结构施工荷载分析，改良土体支护方案，增进经济性以及可靠性。

5.3研究结果在土木工程中的应用潜力

观察固结压力，发现该压力调控黏土抗剪强度的规律，给土木工程设计带来重要的参照，在基坑支护设计中，考虑不同固结压力时土体抗剪强度的变化，可改良支护形式和支护材料用量，减少施工风险，地基承载力计算里，依据不同压力时的内摩擦角跟黏聚力参数，可精确地估量承载能力，保证建筑物的安全性[5]。研究结果还可应用于边坡稳定性分析、地下管廊设计及防洪堤坝工程，凭借改变土体固结状态或者使用预固结处理，增加工程结构的稳定性以及耐久性，达成合理且精细的工程管理。

6 结语

分析不同固结压力下黏土土体的抗剪强度特性，清晰了固结压力作用于内摩擦角、黏聚力及应力-应变响应十分明显，实验结果说明，伴随固结压力增大，土体破坏应力同抗剪能力获得明显增强，弹性阶段有所延长且塑性变形减小，此现象折射出土体于高固结状态下具备更强承载力同稳定性。上述数据不光验证了有效应力理论同摩尔-库仑模型的适用性，更加给基础设计、边坡支护及地下结构施工给予了可靠的参数依据，融合工程实践，合理考量固结压力作用于土体力学性质，可以优化结构设计且增进安全性同经济性，继而给土木工程的合理管理给予坚实保障。

[参考文献]

[1]薛志佳,候鑫,朱文峰,等.物理增强电渗法加固波士顿蓝黏土模型试验[J].工程地质学报,2026,34(02):496-505.

[2]蒋希雁,黄日明,郭志报,等.瓜尔胶改良土的压实特性与强度特性试验研究[J].河北建筑工程学院学报,2025,43(03):8-15+55.

[3]邢耀国.黏土三轴压缩试验方法及抗剪特性研究[J].辽宁省交通高等专科学校学报,2025,27(04):10-13.

[4]黄日明.瓜尔胶改良粉质黏土的固土效果研究[D].导师:蒋希雁.河北建筑工程学院,2025.

[5]张小富.干湿循环条件下非饱和粉质黏土抗剪性能研究[D].导师:张波.山东大学,2025.

作者简介：

尚艳佐(1982--),女,汉族,云南腾冲,本科,助理工程师,研究方向：实验测试。

Copyright © This work is licensed under a Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.