

基于正交设计的砾类土抗剪强度参数试验研究

刘李杰, 吉锋, 魏松

地质灾害防治与地质环境保护全国重点实验室(成都理工大学), 成都 610059

摘要: 砾类土广泛应用于路基、填料、护坡材料等工程中, 由于颗粒大的特性, 使得水分渗透性较强, 并具有较好的稳定性, 因此广泛应用于工程建设中。基于云南某边坡工程, 采用正交设计试验, 设计三因素四水平正交表格, 对不同配比下的砾类土开展直剪试验, 分析了重塑砾类土抗剪强度的影响因素及其规律, 并回归抗剪强度预测模型。试验结果表明, 对于黏聚力和内摩擦角, 影响主次顺序为砾石含量、压实密度、含水率, 砾石含量和压实密度影响显著。试验结果对工程项目安全性评价具有一定参考意义。

关键词: 砾类土; 抗剪强度; 正交设计; 回归分析

中图分类号: P642.1; TU432; TU502 **文献标识码:** A

Experimental Study on Shear Strength Parameters of Gravelly Soils Based on Orthogonal Design

LIU Lijie, JI Feng, WEI Song

State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

Abstract: Gravel soil is widely used in engineering projects such as roadbeds, fillers, and slope protection due to their coarse-grained structure with high permeability and stability. Focusing on a slope engineering project in Yunnan Province, this study employs orthogonal design to establish a three-factor, four-level orthogonal array. Direct shear tests are conducted on gravel soil with varying proportions to analyze the influencing factors and patterns of shear strength in remolded gravel soil, followed by the development of a predictive model for shear strength. Results indicate that the dominant factors affecting cohesion and internal friction angle follow the order: gravel content > compaction density > moisture content, with gravel content and compaction density exhibiting statistically significant impacts. These findings provide some references for safety evaluations in engineering projects.

Key words: Gravel soil; Shear strength; Orthogonal design; Analysis of regression

收稿日期: 2024-05-20 改回日期: 2024-07-01

基金项目: 四川省中央引导地方科技发展项目(2023ZYD0151)

第一作者简介: 刘李杰(1998-), 男, 硕士研究生, 主要从事岩土工程与地质灾害研究。E-mail: 2577818906@qq.com

引文格式: 刘李杰, 吉锋, 魏松. 基于正交设计的砾类土抗剪强度参数试验研究[J]. 地质灾害与环境保护, 2025, 36(1): 69-73.

LIU Lijie, JI Feng, WEI Song. Experimental study on shear strength parameters of gravelly soils based on orthogonal design[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2025, 36(1): 69-73.

0 引言

砾类土的孔隙结构通常较大,具有良好的排水性能和稳定性,因此广泛应用于工程建设中^[1]。抗剪强度作为评价土体性能的重要参数之一,朱彦鹏^[2]等对不同配比的流态固化土进行室内试验,发现了汞送剂和膨润土对内摩擦角和黏聚力的影响要大于其他因素,为风化砂岩作为流态填筑材料提供了参考价值。蔡国军^[3]等选取了5种不同粗粒含量的砾类土展开大型直剪试验,发现随着粗颗粒含量的增加,抗剪强度呈现先增大后减小的趋势,粗粒含量占比在70%时,内摩擦角达到最大值。徐肖峰^[4]等建立4种不同粗粒含量砾类土的离散元计算模型,发现粗粒含量与摩擦系数呈正相关,粗颗粒对力链的控制也越明显。崔凯^[5]等展开大型与小型直剪试验,发现粗粒含量的占比影响了内摩擦角的增长速率,30%和60%的占比为内摩擦角增长速率快与慢的界限值。

目前,研究砾类土的抗剪强度影响参数较多,大多在颗粒级配、干密度、含水率、压实密度、最大粒径、饱和度等方面^[6-10]。

本研究主要针对砾类土的砾石含量占比、含水率、压实密度等因素进行敏感性分析,基于正交设计进行剪切实验,进而对土体的颗粒组成、含水率、压实密度与强度进行分析,建立各因素与强度之间的回归方程^[11],最后验证方程的可靠性。本实验研究可为相关工程安全性评价提供一定理论参考依据。

1 砾类土抗剪强度正交试验

1.1 试验材料

试验材料取自云南某边坡钻孔如图1所示,物质级配曲线如图2所示。该土 C_u 为1.23, C_c 为1.14,级配不良,砾石含量占比较大,夹杂着细颗粒。



图1 钻孔中砾类土

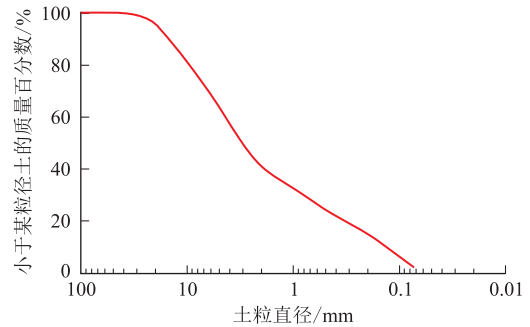


图2 颗粒级配曲线

1.2 正交试验

本次试验选取砾石含量占比、含水率、压实密度3种因素,每个因素设计4个水平,本研究以内摩擦角和黏聚力为研究对象。对于此次涉及4个水平和3个因素的试验,若每个因素一一对应的每个水平都进行一次试验,则需要进行64次试验。因此设计正交表格来进行正交试验,该方法能在所有的试验方案中筛选出具有代表性的方案,在试验次数相对较少的情况下,可以较为全面地了解到各个试验参数对实验结果的影响,从而获得了具有一定可靠性的试验结果。本次试验采用 $L_{16}(4^3)$,因素水平见表1。

表1 正交试验因素水平表

| 水平 | 影响因素 | | |
|----|--------|-------|------------------|
| | 砾石含量/% | 含水率/% | 压实密度(g/cm^3) |
| 1 | 40 | 2 | 1.5 |
| 2 | 50 | 3 | 1.7 |
| 3 | 55 | 4 | 1.9 |
| 4 | 60 | 5 | 2.1 |

1.3 剪切试验

将试样经人工破碎并过筛,为避免试验误差过大,选取的砾石粒径范围在2~5 mm之间,为保证砾石含量占比更精确,经试验最终确定100 g的土样满足一个剪切试验。按照《土工试验方法标准》(GB/T 50123-2019)^[12]的规定,对环刀试样分别施加100 kPa、200 kPa、300 kPa、400 kPa的垂直压力,设定剪切速率为0.8 mm/min,每个平行试验设定3组,最后的结果选择平均值作为基准。试样在3~5 min内剪坏,试验仪器见图3,在破坏后计算出每一组试样的强度参数。

2 试验结果及分析

试验结果见表2,表中为3组平行试验的平均数据。通过使用极差分析法和方差分析法,确定各个因素对试验指标的影响趋势,以及这些因素对不同指标产生的显著影响程度。



图 3 四联直剪仪

表 2 正交试验结果表

| 试验编号 | 砾石含量 /% | 含水率 /% | 密度 (g/cm ³) | 黏聚力 /kPa | 内摩擦角 /° |
|------|---------|--------|-------------------------|----------|---------|
| 1 | 40 | 2 | 1.5 | 7.27 | 15.66 |
| 2 | 40 | 3 | 1.7 | 18.93 | 14.92 |
| 3 | 40 | 4 | 1.9 | 23.66 | 24.72 |
| 4 | 40 | 5 | 2.1 | 31.02 | 28.07 |
| 5 | 50 | 2 | 1.7 | 13.50 | 20.50 |
| 6 | 50 | 3 | 1.5 | 11.31 | 16.35 |
| 7 | 50 | 4 | 2.1 | 28.75 | 30.77 |
| 8 | 50 | 5 | 1.9 | 14.14 | 29.98 |
| 9 | 55 | 2 | 1.9 | 21.53 | 30.31 |
| 10 | 55 | 3 | 2.1 | 26.77 | 33.66 |
| 11 | 55 | 4 | 1.5 | 10.79 | 29.73 |
| 12 | 55 | 5 | 1.7 | 12.97 | 30.17 |
| 13 | 60 | 2 | 2.1 | 3.15 | 43.10 |
| 14 | 60 | 3 | 1.9 | 8.63 | 39.77 |
| 15 | 60 | 4 | 1.7 | 9.74 | 34.10 |
| 16 | 60 | 5 | 1.5 | 6.78 | 32.32 |

2.1 极差分析

表 3 和表 4 分别为黏聚力和内摩擦角的极差分析结果表。 $K_i (i = 1, 2, 3, 4)$ 代表了某一因素在第 i 个水平上的指标之和。 R 代表了 K_i 的最大值与最小值之差, R 值越大, 意味它对各种因素的影响作用越显著。由表 3 和表 4 可见, 影响内黏聚力的主要因素依次是砾石含量、压实密度、含水率, 影响内摩擦角的主要因素依次是砾石含量、压实密度、含水率。

表 3 黏聚力极差分析表

| K 值 | 因素 | | |
|-------------|-------|-------|-------|
| | 砾石含量 | 含水率 | 压实密度 |
| K_1 | 80.88 | 49.85 | 34.71 |
| K_2 | 67.7 | 67.83 | 49.99 |
| K_3 | 72.06 | 69.98 | 67.96 |
| K_4 | 28.00 | 61.28 | 96.28 |
| \bar{K}_1 | 20.22 | 12.46 | 8.67 |
| \bar{K}_2 | 16.9 | 16.95 | 12.49 |
| \bar{K}_3 | 18.01 | 17.5 | 16.99 |
| \bar{K}_4 | 7.00 | 15.32 | 24.07 |
| R | 64.28 | 20.13 | 61.57 |

表 4 内摩擦角极差分析表

| K 值 | 因素 | | |
|-------------|--------|--------|--------|
| | 砾石含量 | 含水率 | 压实密度 |
| K_1 | 83.37 | 109.57 | 94.06 |
| K_2 | 97.6 | 104.7 | 99.69 |
| K_3 | 123.87 | 119.32 | 124.78 |
| K_4 | 149.29 | 120.54 | 132.11 |
| \bar{K}_1 | 20.84 | 27.39 | 23.51 |
| \bar{K}_2 | 24.4 | 26.17 | 24.68 |
| \bar{K}_3 | 30.96 | 29.83 | 31.19 |
| \bar{K}_4 | 37.32 | 30.15 | 33.02 |
| R | 65.92 | 17.89 | 38.05 |

(1) 含水率与黏聚力

含水率和黏聚力的关系见图 4(该曲线是由 16 组试验结果的平均值绘制的, 展示了两者的趋势情况, 图 5~8 也展示了同样的情况)。随着含水率的增加, 重塑土样的黏聚力呈现出先上升后下降的趋势, 峰值点为 3.6%。当土体含水率较低时, 土体的颗粒胶结力会减小, 黏聚力也相应减小, 随着含水率的逐渐增加, 黏聚力也相应有一定程度提升, 当超过了峰值, 由于孔隙水压力的增加抵消了部分击实功效且颗粒间静电分子引力减小, 有效应力下降, 从而导致了黏聚力下降。

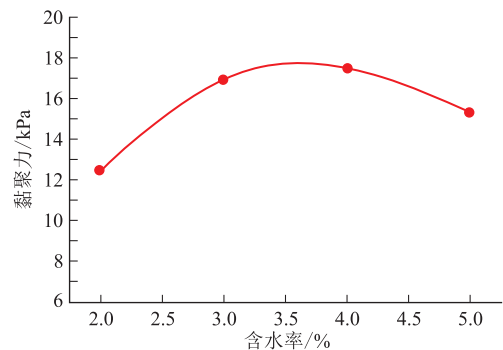


图 4 含水率与黏聚力关系图

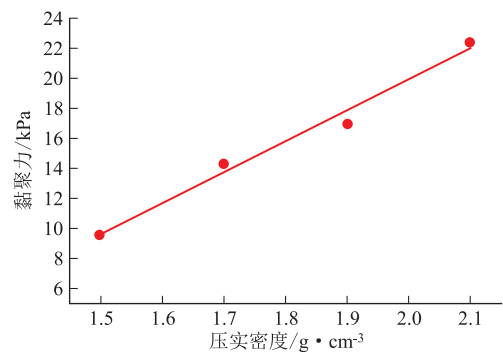


图 5 压实密度与黏聚力关系图

(2) 压实密度与黏聚力

由图 5 可知, 黏聚力和压实密度大致呈线性关系, 随着重塑土样压实密度的增加, 土体中颗粒间的

间距也逐步减小,重塑土样的黏聚力也逐渐地上升。

(3) 砾石含量与黏聚力

由图 6 可知,黏聚力和砾石含量总体呈负相关关系,随着砾石含量的增加,土体中细颗粒在砾石的作用下分离,导致黏聚力下降。

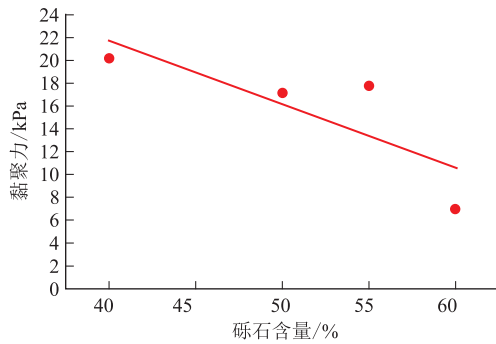


图 6 砾石含量与黏聚力关系图

(4) 砾石含量与内摩擦角

由图 7 可知,砾石含量与内摩擦角大致呈线性关系,随着土体中砾石含量的增加,在剪切过程中,相邻的土体颗粒对于其相对移动的限制效果越显著,内摩擦角也逐渐增大。

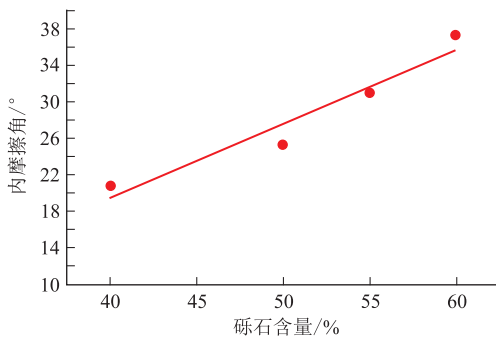


图 7 砾石含量与内摩擦角关系图

(5) 压实密度与内摩擦角

由图 8 可知,压实密度与内摩擦角呈正相关关系,随着压实密度增加,土体中颗粒的接触面积增加,从而增加了内摩擦角。

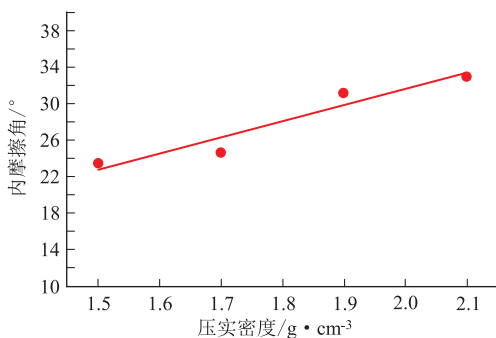


图 8 压实密度与内摩擦角关系图

2.2 方差分析

通过直观的分析,可以清楚地看到各个因素对指标的影响强度。对试验数据进行方差分析来进行显著性评估来判断它是因为因素改变引起的变化还是由试验误差导致的。 F 比为总平均值与各个组的平均值进行比较, F 值越大表明影响越显著。黏聚力和内摩擦角的方差分析见表 5~表 6。

表 5 黏聚力方差分析表

| 因素 | 偏差平方和 | 自由度 | F 比 | 显著性 |
|------|---------|-----|-------|-----|
| 砾石含量 | 396.759 | 3 | 4.238 | 显著 |
| 含水率 | 191.952 | 3 | 2.050 | |
| 压实密度 | 395.539 | 3 | 4.225 | 显著 |
| 误差 | 187.246 | 3 | | |

表 6 内摩擦角方差分析表

| 因素 | 偏差平方和 | 自由度 | F 比 | 显著性 |
|------|---------|-----|--------|-----|
| 砾石含量 | 610.890 | 3 | 21.284 | 显著 |
| 含水率 | 55.315 | 3 | 1.927 | |
| 压实密度 | 204.388 | 3 | 7.12 | 显著 |
| 误差 | 57.404 | 3 | | |

方差分析结果表明:

(1) 影响内黏聚力的主要因素依次是砾石含量、压实密度、含水率,影响内摩擦角的主要因素依次是砾石含量、压实密度、含水率,与极差分析结果一致。

(2) 黏聚力和内摩擦角受到压实密度和砾石含量的显著影响。

3 回归模型建立和检验

3.1 回归模型建立和检验

为了更好地预测砾类土的强度参数,为工程设计提供参考,回归抗剪强度预测模型。设计砾类土黏聚力与砾石含量、含水率和压实密度的回归模型为:

$$Y_1 = a_1 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_1^2 + b_5x_2^2 + b_6x_3^2 \quad (1)$$

内摩擦角的回归模型为:

$$Y_2 = a_2 + b_7x_1 + b_8x_2 + b_9x_3 + b_{10}x_1^2 + b_{11}x_2^2 + b_{12}x_3^2 \quad (2)$$

式中, Y_1 表示黏聚力; Y_2 表示内摩擦角; x_1 为砾石含量; x_2 为含水率; x_3 为压实密度; $a_1, a_2, b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, b_6, b_7, b_8, b_9, b_{10}, b_{11}, b_{12}$ 为回归模型的系数。分析表 3、表 4 得到黏聚力和内摩擦角的预测回归方程为:

$$Y_1 = -55 + 3.66x_1 + 18.57x_2 - 57.16x_3 - 0.04x_1^2 - 2.35x_2^2 + 22.06x_3^2 \quad (3)$$

$$Y_2 = 94.79 - 2.78x_1 + 0.76x_2 - 42.37x_3 + 0.03x_1^2 + 0.07x_2^2 + 15.85x_3^2 \quad (4)$$

黏聚力的回归方程相关系数 R_1^2 为 0.77, 表明黏聚力回归方程具有可靠性, 内摩擦角的回归方程相关系数 R_2^2 为 0.89, 也满足了一定的条件, 证明了内摩擦角方程也同样可靠。

3.2 回归模型的验证

为了进一步验证方程(3)和方程(4)的可靠性, 把实际测量的数据与回归方程的预测结果进行对比, 如图9~10所示, 可以看出, 大多数的计算值与实测值是接近的。

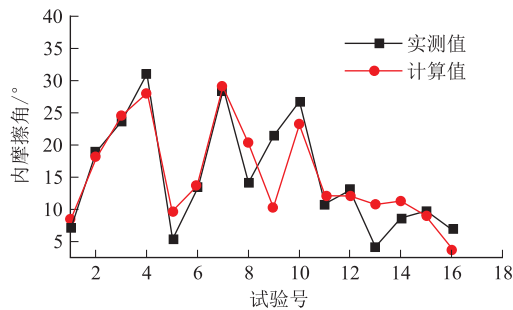


图9 黏聚力计算值与实测值关系图

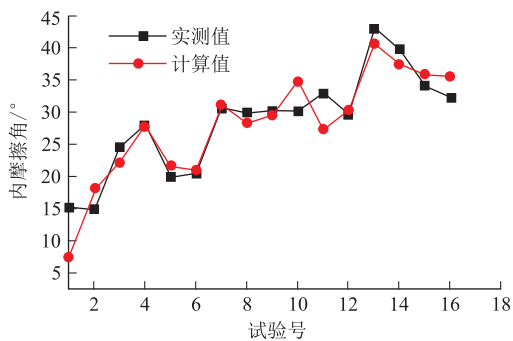


图10 内摩擦角计算值与实测值关系图

4 结论

本文通过正交试验研究了砾石含量、含水率、压实密度对砾类土抗剪强度的影响, 初步结论如下:

(1) 通过正交试验得到了砾石含量、含水率、压实密度对砾类土抗剪强度的影响顺序及显著性。对于黏聚力和内摩擦角, 影响主次顺序为砾石含量, 压实密度、含水率, 砾石含量和压实密度影响显著。

(2) 砾类土黏聚力随含水率增大先增大后减小, 随砾石含量的增加而减小, 随压实密度增大而增大。内摩擦角随砾石含量增大而增大, 随压实密度的增大而增大。

(3) 回归了砾类土黏聚力与内摩擦角的预测模型, 并验证了公式的可靠性。

参考文献

- [1] 刘大鹏, 杨晓华, 王婧, 等. 砾类土在循环荷载作用下的变形影响因素试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2014, 11(4): 68-72.
- [2] 朱彦鹏, 浩, 刘东瑞, 等. 基于正交设计的风化砂岩流态固化土抗剪强度试验研究[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(S1): 46-51.
- [3] 蔡国军, 陈世豪, 周扬, 等. P5 含量对砾类土强度与变形特性影响的试验研究[J]. 水利水电技术, 2020, 51(1): 187-195.
- [4] 徐肖峰, 魏厚振, 孟庆山, 等. 粗粒含量对砾类土直剪过程中强度与变形特性影响的离散元模拟研究[J]. 工程地质学报, 2013, 21(2): 311-316.
- [5] 崔凯, 苏磊. 粗颗粒含量对川西混合土抗剪强度的影响[J]. 西南交通大学学报, 2019, 54(4): 778-785.
- [6] 朱彦鹏, 杨校辉, 周勇, 等. 基于含水量和干密度影响的压实土抗剪强度试验[J]. 兰州理工大学学报, 2016, 42(6): 114-120.
- [7] 魏厚振, 汪稔, 胡明鉴, 等. 蒋家沟砾石土不同粗粒含量直剪强度特征[J]. 岩土力学, 2008, 29(1): 48-51, 57.
- [8] 郝腾飞, 喻邦江. 粗颗粒含量对砾石土抗剪强度影响的试验研究[J]. 地质灾害与环境保护, 2018, 29(3): 73-76.
- [9] 王存利, 唐栋, 李毅峰, 等. 基于考虑含水率对土体抗剪强度参数影响的边坡稳定性分析[J]. 科技创新与应用, 2024, 14(6): 61-64.
- [10] 夏婷, 代张音, 杨银凯, 等. 含水率对滑带土抗剪强度的影响[J]. 矿业工程研究, 2023, 38(4): 60-66.
- [11] 朱彦鹏, 马滔, 杨校辉, 等. 基于正交设计的红砂岩改良土抗剪强度试验和回归分析[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(S1): 87-92.