

不同填料颗粒级配对加筋土界面剪切强度与剪胀特性的影响机制研究

王娥 熊甜甜 刘震 范娣 杨江波

西安思源学院, 陕西西安, 710038;

摘要: 加筋土技术的核心在于筋材与填料之间的界面相互作用。填料的颗粒级配是控制界面力学行为的关键因素之一。本文通过系统性的室内直剪试验, 研究了三种不同颗粒级配(良好级配、均匀级配、含细粒级配)的砂土填料与一种常见聚酯经编土工格栅的界面剪切特性。重点分析了不同级配填料下筋-土界面的剪切应力-剪切位移关系、剪胀行为以及界面强度参数的变化规律。试验结果表明: 填料的颗粒级配显著影响界面的峰值和残余强度、剪胀程度以及咬合作用机制。良好级配填料由于颗粒间的嵌锁和重组能力更强, 表现出最高的界面摩擦角和显著的剪胀效应; 均匀级配填料界面咬合作用较弱, 易出现应变软化; 含细粒填料在低法向应力下强度较高, 但在高法向应力下易产生颗粒破碎导致强度损失。本研究揭示了颗粒级配通过调控颗粒迁移、重组和破碎行为来影响界面力学性能的微观机制, 为加筋土结构填料的优化选择提供了重要的理论依据和设计参考。

关键词: 加筋土; 颗粒级配; 界面剪切强度; 剪胀特性

DOI: 10. 64216/3080-1508. 25. 10. 020

引言

加筋土技术因其良好的工程性能和经济性, 已被广泛应用于挡土墙、边坡加固、桥台建设等岩土工程领域。其工作原理是通过在土体中引入抗拉强度高的筋材(如土工格栅、土工织物), 利用筋材与填料之间的界面摩擦力将土体的侧向土压力传递给筋材, 从而限制土体的变形, 提高土体的整体稳定性和承载能力。因此, 筋-土界面的力学性能是决定加筋土结构安全性与耐久性的核心所在。

筋-土界面的剪切特性是一个复杂的多因素耦合问题, 主要受筋材类型(几何形状、表面粗糙度、刚度)、填料特性(颗粒形状、粒径、级配、密实度)以及外界条件(法向应力、含水率、加载速率)的影响。其中, 填料的颗粒级配是影响颗粒与筋材相互作用方式的基础性因素。不同的级配决定了填料颗粒的孔隙结构、渗透性、内摩擦角以及其在剪切过程中的迁移和重组能力, 进而从根本上调控着界面的剪切强度发挥和变形特性。

目前, 国内外学者对筋-土界面特性已进行了大量研究, 但多数集中于筋材类型、法向应力、含水率等因素, 对于填料颗粒级配的系统性研究仍相对不足。一些研究发现, 良好级配的砂砾料能提供更高的界面摩擦系数, 但其内在的影响机制, 特别是与剪胀特性这一关键微观力学行为的关联, 尚缺乏深入的阐释^[1,2,8]。剪胀是

颗粒材料在剪切过程中因颗粒翻越、重排而产生体积膨胀的现象, 它不仅是强度增长的重要来源, 也直接影响加筋土结构的变形控制。

基于此, 本文旨在通过室内直剪试验, 系统探究不同颗粒级配填料对筋-土界面剪切强度和剪胀特性的影响规律。通过对比分析不同级配填料界面的应力-应变曲线、强度参数和体积变化行为, 从微观颗粒力学角度揭示其影响机制, 以为加筋土工程中填料的科学选型与优化设计提供理论支撑和数据支持。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

筋材: 本研究采用一种双向聚酯经编土工格栅(PET)。其极限抗拉强度为 80kN/m, 纵横向肋条间距均为 25mm, 节点厚度约为 1.5mm。该筋材表面粗糙, 能为填料颗粒提供良好的咬合条件。

填料: 制备了三种具有代表性的颗粒级配填料:

良好级配砂砾料(GW): 不均匀系数 $C_u > 5$, 曲率系数 C_c 介于 1~3 之间, 包含从粗砂到细砾的连续颗粒, 最大粒径控制在 5mm。

均匀级配砂(SP): 以中砂为主, 粒径集中分布在 0.25~0.5mm, $C_u < 3$, 级配曲线平缓。

含细粒级配砂(SM): 在均匀级配砂中掺入 10%(质量

比)的粉土颗粒(粒径 $<0.075\text{mm}$),以模拟工程中常见的含细粒土填料。所有填料均烘干后使用,以排除含水率的影响。

1.2 试验装置与方法

试验采用大型恒应力直剪仪(剪切盒尺寸 $300\text{mm}\times 300\text{mm}\times 150\text{mm}$)。下剪切盒填充土样,上剪切盒固定筋材。为确保筋材完全被固定,将土工格栅两端用高强度夹板夹紧,并锚固在剪切盒两侧的刚性支架上。

试验步骤如下:

试样制备:采用干装法分层填装填料,控制压实功使三种填料均达到相同的相对密实度($D_r\approx 70\%$),以保证试验结果的可比性。

法向应力加载:施加四级法向应力(σ_n): 50kPa , 100kPa , 200kPa , 300kPa 。该范围可覆盖中低挡土墙所承受的应力水平。

剪切过程:采用应变控制式剪切,剪切速率设定为 $1\text{mm}/\text{min}$,直至剪切位移达到 30mm (即剪切应变 10%),以确保试样充分剪切至残余强度状态^[7]。试验过程中自动记录剪切应力(τ)、剪切位移(δ)和竖向位移(Δh ,用于计算体积变化)。

每组试验条件重复两次,取平均值以确保数据的可靠性。

2 试验结果与讨论

2.1 剪切应力-剪切位移关系

不同级配填料在不同法向应力下的剪切应力-剪切位移曲线呈现出显著差异。

良好级配填料(GW):在所有法向应力下,曲线均表现出明显的应变硬化特性。剪切应力随位移增加而持续增长,在较大位移处(约 $15\sim 20\text{mm}$)达到峰值,且未见明显跌落。这表明GW填料具有持续的抗剪能力,归因于颗粒的不断重组和嵌锁^[1,4]。

均匀级配填料(SP):曲线呈现典型的应变软化特征。在较低法向应力(50 、 100kPa)下,曲线出现一个尖锐的峰值,随后应力下降并逐渐趋于稳定的残余值。在高法向应力下,峰值特征减弱,向硬化型转变。这是因为低应力下,颗粒易于滚动和滑动,导致咬合结构迅速破坏;高应力下,颗粒间法向力增大,滑动摩擦成为主导^[2,6]。

含细粒级配填料(SM):其行为介于GW和SP之间。

在低法向应力下,曲线类似SP,有轻微软化;但随着法向应力增大($\geq 200\text{kPa}$),曲线逐渐变为硬化型,但其峰值强度低于GW。细颗粒的存在填充了孔隙,初始密度高,但在高应力下细颗粒可能发生破碎或重新分布,影响了强度的充分发挥^[1,3]。

2.2 剪胀特性分析

竖向位移(Δh)曲线直接反映了界面的剪胀($\Delta h>0$)或剪缩($\Delta h<0$)行为。

GW 填料:表现出最强烈的剪胀。剪切开始时试样先发生轻微剪缩(颗粒重新排列),随后迅速进入剧烈的剪胀阶段。剪胀量与法向应力负相关,即法向应力越小,剪胀越显著。这是因为低约束下颗粒更容易被筋材肋条“撬动”而发生翻越和滚动^[5,6]。

SP 填料:剪胀现象较弱。在低法向应力下有一定程度的剪胀,但幅度远小于GW。在高法向应力下,几乎表现为纯剪缩或微弱的剪胀后立即进入剪缩。这是因为均匀的圆形砂粒更容易滚动和滑动,难以形成稳定的抗旋转嵌锁结构。

SM 填料:其体积变化行为复杂。低应力下,由于初始孔隙率较低,主要表现为持续剪缩。高应力下,先剪缩后出现微弱的剪胀,这是由于部分粗颗粒骨架开始发挥作用,但细颗粒抑制了整体的体积膨胀。

2.3 界面强度参数

通过绘制不同法向应力下的峰值剪切强度 τ_p 和残余剪切强度 τ_r 曲线,采用库仑准则: $\tau=c+\sigma_n\cdot\tan\delta$ 进行拟合,得到界面粘聚力 c 和界面摩擦角 δ 。

峰值强度:GW填料的界面摩擦角 δ_p 最高,达到 32° 。SP和SM的 δ_p 相近,约为 28° 。SM填料表现出一定的表观粘聚力($c\approx 5\text{kPa}$),源于细颗粒的吸附作用和毛细作用(尽管为干燥状态,但极细颗粒间可能存在物理化学作用),而GW和SP的 c 值接近于0。

残余强度:三者的残余强度摩擦角 δ_r 差异缩小。GW的 δ_r 约为 30° ,仍为最高。SP和SM的 δ_r 均降至 26° 左右。这表明在经过大位移剪切后,不同填料的界面结构趋于一个以滑动摩擦为主的稳定状态,但GW因颗粒嵌锁效应保留了一定的额外强度。

3 影响机制分析

试验结果的差异根植于不同级配填料在剪切过程中颗粒运动的微观机制。

3.1 颗粒嵌锁与重排机制

良好级配填料(GW)拥有从粗到细的连续颗粒分布。在剪切过程中,大小颗粒相互填充,形成一种稳定的“骨架-填充”结构。当与有肋的土工格栅相互作用时:

被动阻力的发挥:格栅的横肋对相邻的粗颗粒形成强大的被动阻挡作用。

颗粒重组:剪切带内的颗粒在筋材拉动下发生强制性的重排和旋转,细颗粒填入大颗粒间的孔隙,使整个体系变得更加密实和稳定。

咬合强化:这种密集的、大小颗粒联动的嵌锁体系极大地限制了颗粒的滚动和滑动,使剪切必须通过提升法向应力(即表现为剪胀)或克服颗粒间巨大的摩擦力来实现,从而宏观上表现出高剪切强度和持续的应变硬化。剧烈的剪胀正是颗粒为继续运动而被迫抬升(翻越)其他颗粒或筋材肋条的宏观体现。

3.2 颗粒滚动与滑动主导机制

均匀级配填料(SP)颗粒粒径单一,孔隙率较高,颗粒间以点接触为主。在剪切过程中:

咬合作用弱:颗粒易于在格栅表面发生滚动和相对滑动。

结构不稳定性:虽然初始时也能形成暂时的咬合结构并产生峰值强度,但该结构非常脆弱,一旦破坏,颗粒便进入以滚动和滑动为主的稳定状态,导致应力软化。

剪胀受限:颗粒的滚动虽能引起少量体积膨胀,但难以形成持久、强大的嵌锁力。在高法向应力下,颗粒被压碎或压入孔隙的概率增加,滚动受阻,滑动摩擦成为主导,故曲线向硬化型转变。

3.3 细粒影响的耦合机制

含细粒填料(SM)是一个二元体系,其行为是粗颗粒骨架和细颗粒填充物共同作用的结果。

低应力下的“润滑”与“胶结”竞争:低应力下,细颗粒可能起到“润滑”作用,降低粗颗粒间的摩擦;但同时,它们又可能通过吸附作用产生微弱的“胶结”,提供表观粘聚力。通常“胶结”作用在低应力下更显著。

高应力下的颗粒破碎与重组:高法向应力下,应力更集中,细颗粒和部分粗颗粒角隅可能被压碎。破碎的细颗粒进一步填充孔隙,使土体更密实,但同时也破坏了原有的粗颗粒骨架,削弱了其承载能力(“软化”效应)。这与SM在高应力下强度增长率低于GW的现象相

符。其剪胀行为被抑制,因为细颗粒几乎完全填充了孔隙,限制了粗颗粒移动和翻越的空间。

3.4 筋材-颗粒相互作用的尺度效应

土工格栅的孔径(25mm)与填料最大粒径(5mm)的比例约为5:1,这意味着颗粒可以被肋条有效约束和咬合,而非从孔中漏出。GW填料中的小颗粒能有效填充格栅孔眼,形成“石楔”效应,极大地增强了机械互锁。而SP填料则缺乏这种有效的填充,咬合作用较弱。

4 结论

本文通过系统的室内直剪试验,研究了不同颗粒级配填料与土工格栅的界面剪切特性,并深入分析了其内在影响机制,主要得出以下结论:

(1)填料的颗粒级配是控制筋-土界面力学行为的关键因素。良好级配填料(GW)能产生最高的界面剪切强度和最显著的剪胀效应,其应力-应变关系表现为持续的应变硬化,界面摩擦角最高(32°)。

(2)剪胀特性与级配密切相关。GW填料因强大的颗粒嵌锁和重组能力而表现出剧烈剪胀;均匀级配填料(SP)以颗粒滚动和滑动为主,剪胀微弱;含细粒填料(SM)的剪胀行为受细粒抑制,主要表现为剪缩。

(3)界面强度发挥的微观机制不同:GW以颗粒嵌锁与重组为主导,强度来源于持续的咬合作用和剪胀;SP以颗粒滚动与滑动为主导,易出现应变软化;SM则表现为粗粒骨架与细粒填充的耦合作用,低应力下“胶结”占优,高应力下颗粒破碎导致强度损失。

在加筋土结构设计中,应优先选择良好级配的砂砾料作为填料,可充分发挥筋材的加筋效应,获得更高的界面强度和更好的变形控制能力。应审慎使用均匀级配砂,必要时可对其进行级配改良。对于含细粒土,需注意其在高应力下的长期强度可能有所折减,并进行针对性设计。

本研究深化了对筋-土界面微观机理的理解,后续研究可借助离散元(DEM)数值模拟和微观结构观测(如CT扫描)技术^[3,6],进一步可视化并量化剪切过程中的颗粒运动,从而建立从微观到宏观的精准预测模型。

参考文献

[1]王家全,林鸿,唐毅,唐滢.细粒含量对土工格栅-砾性土界面剪切特性的影响分析[J].水文地质工程地质,2025,25(4):1407-1414.

[2]刘洋,朱永平,李江涛,颜鹏飞,杜铖,张雨生,等.基于大型直剪试验的粒径对土工格栅加筋粗粒土剪切特性影响的分析[J].自然灾害学报,2025,34(2):185-195.

[3]靳静,温馨,梁小勇,张其一,何春晓.不同横肋间距的土工格栅界面特性宏观研究[J].铁道科学与工程学报,2025,22(4):1289-1299.

[4]JEWELL R A.Reinforced soil wall analysis and behavior[M]//Application of Polymeric Reinforcements in Soil Retaining Structures. Springer Netherlands, 1985: 1-60.

[5]BOLTON M D.The strength and dilatancy of sands[J]. Géotechnique, 1986, 36(1): 65-78.

[6]PALMEIRA E M.Soil-geosynthetic interaction: Modelling and analysis[J]. International Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 3(1): 57-74.

[7]ASTM D5321 / D5321M-20.Standard Test Method

for Determining the Shear Strength of Soil-Geosynthetic and Geosynthetic-Geosynthetic Interfaces by Direct Shear[S]. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2020.

[8]刘保健,谢定义,张士乔.土工格栅与土界面相互作用特性试验研究[J].岩土工程学报,2000,22(6):691-695.

作者简介:王娥(2002.05—),女,汉族,陕西省榆林市,学士学位,研究方向:土木工程。

通讯作者简介:熊甜甜(1982.01—),女,汉族,江苏省徐州市,教授,在读博士。研究方向:加筋土界面力学研究。

基金项目:本研究为陕西省大学生创新创业训练计划项目成果(项目编号:202413121014);主办单位:西安思源学院;课题名称:不同角度3D打印制样模拟加筋黄土破坏特性实验研究。