

筋土界面力学特性研究综述

田羌恒

同济大学 上海 200092

【摘要】：这篇论文主要介绍了直剪试验和拉拔试验两种筋土界面参数的测试方法，探讨了不同含水率、土工材料类型、剪切速率、填料级配、法向应力和冻融循环等因素对界面摩擦系数和抗剪强度的影响。试验结果表明，筋土界面力学特性受多因素耦合影响，总体趋势为：土体含水率越小，法向应力越大，界面摩擦系数越大。土工材料和冻融循环等因素会改变界面整体结构，需要额外进行考虑。本文对目前的测试方法和研究进展做了简单的总结。

【关键词】：加筋土；界面特性；直剪试验；拉拔试验

DOI:10.12417/2811-0722.26.04.084

引言

随着城市化进程的加速和基础设施建设规模的扩大，传统土工工程正面临日益严峻的地质与环境挑战。土工合成材料作为一种绿色低碳的新型材料，在现代工程中展示了独特的优势。加筋土技术通过在土体拉伸变形区铺设具有抗拉强度的土工合成材料，二者相互作用形成复合体，显著提升土体强度并改善变形特性。目前，加筋土技术已广泛应用于路堤、边坡、挡墙及地基等构筑物，因其稳定性好、抗震性强、变形适应性强、施工方便、造价低廉且绿色环保，已成为解决大跨桥梁、软土地基及边坡防护等复杂工程难题的经济、高效且可持续的解决方案。

1 筋土界面参数测试方法

JTG E50-2006 公路工程土工合成材料试验规程^[1]中，描述了用于测定土工合成材料与填土之间的直剪试验和拉拔试验全过程。

1.1 直剪试验

直剪试验需使用符合规定的剪切仪：

剪切盒要求：接触面积保持不变的剪切盒应具备足够的刚性，尺寸不小于 300mm×300mm，盒厚度至少为盒长的 50%，以容纳砂土层和加压系统。若试验对象为土工格栅，剪切盒的最小尺寸应适当增加。盒下部配备刚性滑板，长度至少为盒长加试样尺寸的 16.5%，以确保在相对位移达 16.5%时试样与砂土之间保持完全接触。

加载与控制：位移速率设置为 1mm/min±0.2mm/min，法向力施加装置应能均匀加载且精度达到 2%。

试验步骤：试验首先将试样平铺于下部刚性基座并夹持前端，填充预称质量的待测试样并保持均匀。安装水平力加载仪和位移传感器，施加初始法向压力（如 50kPa），随后施加水平荷载，间隔 12s 测量剪切力并记录位移，直至位移达 15% 结束。卸载后清除填土，随后在 100kPa、150kPa 和 200kPa 等后续压力下重复上述步骤，以获取不同法向应力下的力学特性。

1.2 拉拔试验

拉拔试验需使用符合规定的拉拔仪：

试验箱要求：矩形箱体尺寸不宜小于 25cm×20cm×20cm（长×宽×高），侧壁应具备足够的刚度且受力时不变形。箱体一侧半高处设有一条贯穿全宽的窄缝（高约 5mm），用于试样引出箱体。窄缝内壁应配备可上下抽动的插板，以调整缝隙大小防止土粒漏出。

试验步骤：试验首先将土料分层填入试验箱并按要求压实至目标密度，压实后土面略高于箱侧窄缝下缘。将试样平放于土面上，确保平整无皱，且在长度方向上埋入土中的长度为 100-150mm，居中放置，并将试样一端从窄缝引出箱外，与水平夹具连接。随后继续填土并压实至目标密度，土面平整且略低于箱顶，放置加压板。安装垂直和水平位移百分表，对试验箱进行对中，对加压板施加微量垂直荷载以确保接触良好，随后施加要求的垂直荷载进行固结。固结后施加微量水平荷载绷紧装置，最后施加水平荷载进行拉拔，测读并记录位移量和水平拉力，直至出现峰值或试样被拉断。该过程需在不同垂直荷载下重复，完成四级不同垂直荷载下的拉拔摩擦试验。

1.3 筋土界面参数的关键影响因素

筋土界面参数（主要指黏聚力与内摩擦角）是一个高度耦合的过程，其数值大小受多种环境、材料及施工因素的共同支配。综合现有研究，主要影响因素包括含水率、法向应力、剪切速率、压实度、填料类型、试样级配、土工合成材料类型、界面温度以及冻融循环次数等，通常可归纳为物理环境因素、材料与结构因素、施工质量因素以及极端气候因素四个维度。下文我将对这些因素进行具体分析。

2 筋土界面力学特性研究进展

筋土结构的整体性能在很大程度上取决于界面层的力学特性。该界面层作为“薄弱面”，其行为不仅受本身材料特性的支配，还高度敏感于环境、施工及气候条件的变化。本节依据现有文献，对影响筋土界面特性的主要因素进行系统梳理，重点分析其作用机理及数值规律。

2.1 物理环境因素

含水率是决定界面摩擦特性的关键参数。大量试验结果表明,界面的峰值剪应力随含水率的变化呈现典型的“倒U型”曲线。具体而言:最佳含水率段:当含水率逐渐升高至某一临界值(通常称为最佳含水率)时,水分填充了土体中的孔隙,并形成了薄膜润滑作用。此时,土粒与筋材之间的机械锁定(咬合)效应增强,界面黏聚力达到峰值,抗拔力随之达到最高水平。过度饱和段:若继续增加含水率,水膜厚度将大幅度增长。此时,水膜的润滑作用开始占据主导,原有的机械咬合被破坏,土粒间的直接接触被削弱。结果是,黏聚力和内摩擦角均出现显著下降,导致界面抗剪强度急剧衰减。郝攀和刘芳^[2](2007)的研究进一步揭示了含水率对界面摩擦机理的细节。通过对土工格栅-粉土界面进行拉拔试验,他们发现似摩擦系数随含水量增加而呈现出显著的降低趋势。这是因为水分降低了土体的内聚力,使得格栅难以在土体中形成有效的锁定。

法向应力是另一关键控制变量。试验数据显示,在相同的含水率条件下,随着法向应力的增大,界面峰值剪应力呈现线性增长的趋势。这种现象主要源于两个机制:压实效应:增加的法向应力压实了接触面,减小了微观粗糙度,提升了接触刚度。锁定增强:土体在高应力下更紧密,格栅与土体之间的咬合力随之增强。魏军扬等^[3](2013)通过对土工格栅-黏土界面的拉拔试验发现,筋土界面的强度包线与方法向应力呈线性关系。然而,值得注意的是,在相同的法向荷载下,筋土界面的拔出强度约为未加筋的直剪强度的80%左右,验证了界面层作为薄弱面的特性。

虽然传统观点认为剪切速率对界面强度影响不大,但细分后发现拉拔速率的影响更为显著。具体表现为:静摩擦阶段:在格栅被拉紧且有效摩擦长度不断增大的阶段,黏聚力和摩擦角保持相对稳定。动摩擦阶段:当格栅被拉动至一定程度后,界面松动破坏,摩擦强度出现下降;随后格栅的横肋切割土体,摩擦强度再次增强。残余阶段:最终进入完全松动破坏的残余阶段,摩擦强度大幅降低并趋于稳定。郝攀和刘芳^[2](2007)通过拉拔曲线分析,将该过程划分为四个阶段,并分别定义了拉动似摩擦系数、极限似摩擦系数和残余似摩擦系数,构建了更细致的力学模型。

2.2 材料与结构因素

筋材本身的微观结构决定了其与土体的相互作用模式。研究表明,格栅的空隙率和填料的级配是影响界面强度的核心因素。

格栅空隙率是衡量格栅结构致密程度的指标。实验证明,格栅的空隙率越大,其肋条对土体的约束作用越弱,从而导致界面黏聚力显著降低。这是因为高空隙率直接减少了格栅与土体的接触面积,削弱了机械咬合效应。熊甜甜等^[4](2018)的

研究证实了这一点:在相同含水率下,空隙率大的筋材其界面抗剪强度远低于空隙率小的筋材。

填料的颗粒组成对界面强度有显著影响。适量增加粗颗粒(如碎石、碎砾)能够显著提升界面抗拔力。压实度提升:粗颗粒填充了细颗粒之间的空隙,显著降低了整体孔隙率,使土体更难在受压时发生变形。粗颗粒的加入增加了土体的内聚力和内摩擦角,使得土粒对格栅的锁定更为牢固。刘飞禹等^[5]的研究对比了不同级配的砂石与格栅的界面特性,发现粗砂与格栅的界面剪切强度明显高于混合砂,且达到峰值强度所需的剪切位移存在显著差异,进一步证明了填料级配的关键作用。

2.3 施工质量因素

填土的压实程度直接影响界面的强度。试验数据显示,压实度越高,土体颗粒之间的接触越紧密,界面咬合力越大,抗拔力越强。此外,格栅的埋设长度(或嵌固长度)也对界面性能产生显著影响,埋设长度越长,格栅对土体的约束力越大,界面抗拔力越高。张琬等^[6]采用大型结构面剪切仪开展土工格栅-黄土界面直剪试验,研究黄土压实度对筋土界面剪应力-剪切位移关系、抗剪强度指标和剪切带厚度的影响。试验结果显示,随着黄土压实度增大,筋土界面的粘聚力明显增大,但摩擦角变化不大,抗剪强度略有提高筋土界面剪切带厚度增大,并在达到90%压实度时骤增。

2.4 极端气候因素

在高寒地区,冻融循环是导致界面退化的主要因素。试验表明,土体温度和冻融循环次数都影响到筋土界面黏聚力和摩擦角。孟亚等^[7](2024)研究了界面温度、冻融循环次数对筋土界面剪切特性的影响,开展了砂土-土工格栅界面直剪试验。试验结果表明,加筋可明显提高冻土的抗剪强度,筋土界面剪应力随着界面温度的降低而增大,当界面温度在0℃以下时,剪应力较大,而当界面处于非冻结状态时,筋土界面剪切应力小且稳定值基本相同,说明冻结可增强土工格栅的加筋作用,且温度越低,加筋效果越好。同时发现,冻融循环会降低土工格栅在砂土中的加筋作用,筋土界面黏聚力和摩擦角均随着冻融循环次数的增加而减小,但在4次冻融循环后趋于稳定。

3 筋土界面数值模拟研究进展

在填料为粗粒土的筋土界面数值模拟方面,邵琪琳^[8](2018)采用颗粒流软件PFC2D开展土工合成材料-砂土界面直剪试验数值模拟,从微观角度探究填料级配和筋材类型对筋土界面力学特性的影响。刘飞禹等^[9](2023)建立了土工格栅-土石混合体界面直剪试验模型,验证了含石量对筋土界面强度的影响。同时从细观力学角度分析了接触力链对筋土界面强度的影响。结果表明,剪切过程中细颗粒对粗颗粒间孔隙进行填充,且格栅有效限制了粗颗粒的转动,提高了筋土界面抗剪强度。Du等^[10](2023)基于土工格栅-风积沙的拉拔试验建立了

三维离散元拉拔模型,研究了土工格栅节点加固队筋土界面力学特性的影响。结果表明,加固节点有效提高了界面的抗拉强度,抗拉强度的增加与加固节点的数量呈线性关系。

在填料为细粒土的筋土界面数值模拟方面,李水江等^[11]基于不同含水率下残积土的筋土界面直剪试验,利用有限差分软件分析了不同含水率下筋土界面抗剪强度的参数。刘飞禹等^[12](2024)利用离散元数值模拟软件,建立含水率-似黏聚力-黏聚分量的函数关系,模拟出不同含水率下土工织物-花岗岩残积土界面的直剪试验,揭示不同含水率条件下筋土界面直剪试验中剪切带的形态变化和颗粒的位移规律。

参考文献:

- [1] 公路工程土工合成材料试验规程:JTG E50-2006[S],2006.
- [2] 郝攀,刘芳.格栅与粉土的拉拔试验研究[J].山西建筑,2007,(26):129-130.
- [3] 魏军扬,王保田,张海霞,等.加筋土筋土界面特性分离式试验研究[J].华东交通大学学报,2013,30(05):57-62.
- [4] 熊甜甜,廖红建,杨博,等.加筋土筋土界面抗剪强度影响因素试验研究[J].地下空间与工程学报,2018,14(03):629-634.
- [5] 刘飞禹,林旭,王军.砂土颗粒级配对筋土界面抗剪特性的影响[J].岩石力学与工程学报,2013,32(12):2575-2582.
- [6] 张琬,张庆瑶,薛一峰,等.黄土与土工格栅界面剪切力学特性研究[J].应用力学学报,2025,42(06):1340-1352.
- [7] 孟亚,徐超,贾斌,等.含水率和冻融循环对筋土界面剪切特性的影响[J].中南大学学报(自然科学版),2024,55(02):586-594.
- [8] 邵琪琳.加筋土界面力学特性试验及颗粒流数值模拟研究[D].青岛理工大学,2018.
- [9] 刘飞禹,孔剑捷,姚嘉敏.含石量和压实度对格栅-土石混合体界面剪切特性的影响[J].岩土工程学报,2023,45(05):903-911.
- [10] Du W,Nie R,Tan Y,Zhang J,Qi Y,Zhao C.Influence of Strengthened Nodes on the Mechanical Performance of Aeolian Sand-Geogrid Interface.Materials(Basel).2023 Jun 28;16(13):4665.
- [11] 李水江,童艳光,刘飞禹,等.不同含水率下考虑筋土界面刚度软化的加筋边坡地震响应[J].防灾减灾工程学报,2023,43(04):862-870+877.
- [12] 刘飞禹,宋文捷,付冬平.含水率对花岗岩残积土-织物界面剪切特性的影响[J/OL].土木与环境工程学报(中英文),1-11[2024-10-24].

4 结论

本文系统梳理了当前土工合成材料加筋技术在筋土结构中的应用与发展。从基础的物理环境因素(含水率、法向应力)到材料的微观结构(土工合成材料类型、填料级配),再到施工工艺(压实度)以及极端气候(温度、冻融循环)的影响机理,研究表明筋土结构的整体性能是这些因素共同耦合作用的结果。筋土技术作为一种成熟且高效的加筋方式,其理论研究与工程应用正逐步深入。通过理论与实验的不断完善,我们有理由相信,随着新技术的引入和设计理念的创新,加筋土结构将在未来的岩土工程领域发挥更加关键的作用。