

规则齿形异性结构面直剪试验研究

蒋孝鹏

浙江华东测绘与工程安全技术有限公司 浙江杭州 311122

摘要: 本文采用直剪试验对石膏-混凝土异性结构面进行了系统分析, 探讨不同起伏角度和正应力条件下的抗剪强度变化规律, 揭示了异性结构面剪切特性的关键参数及其工程应用价值。结果表明, 异性结构面抗剪强度与起伏角度和正应力密切相关, 并在特定角度下呈现出剪切强度峰值的临界现象。

关键词: 异性结构面; 直剪试验; 抗剪强度; 剪切强度峰值

引言

岩石力学中, 结构面是指岩体内部存在的各种物理和力学性质显著不同于周围岩体的面状或带状结构; 在这其中, 由于成因、物质组成或几何形态上的差异, 导致物理力学性质各向异性的结构面被称为异性结构面^[1]。异性结构面具有独特的物理力学特性, 其存在和分布对岩体的稳定性和变形行为具有显著影响^[2]。在岩体工程中, 如隧道、边坡、地下洞室等, 异性结构面的力学行为和破坏特性是影响工程安全和稳定的重要因素之一。

研究异性结构面的抗剪强度对于工程实践和理论研究具有重要意义。许多地质灾害, 如滑坡和岩崩等, 往往与结构面的剪切破坏密切相关。通过研究结构面的抗剪强度, 可以提高地质灾害的预测和预防能力, 减少灾害损失^[3]。

针对不同成因和性质的异性结构面, 研究者开展了大量试验研究, 分析其剪切强度和变形特性^[4]。早期研究主要通过直剪试验测定不同类型结构面的剪切强度参数。Barton和Choubey(1977)提出了基于结构面粗糙度和填充物性质的剪切强度经验公式, 为后续研究提供了理论基础。为提高直剪试验的精度和可靠性, 研究者不断改进试验设备和方法^[5]。例如, 采用更先进的应力和位移传感器, 提高数据采集的精度; 通过引入新型加载方式, 模拟更真实的工程应力条件。

异性结构面直剪试验作为研究岩体力学特性的核心方法之一, 对理解和预测岩体工程中的结构面行为具有重要意义。通过不断完善试验方法和深入分析试验结果, 能够为岩体工程设计提供更科学的依据, 提高工程安全性和可靠性。

一、试验设计

1. 试验装置简介

利用直剪仪开展本次异性结构面直剪试验, 直剪仪结构组成如图1所示。该装置主要包括垂向夹持和横向剪切2个荷载千斤顶、位移百分表和上下2个剪切盒。其中, 剪切盒内部的左右两侧为固定金属体, 前后两侧为活动金属体, 通过旋转螺丝可使样品试件保持固定与水平。该装置底部钢板的高度可手动调整, 可避免因上下剪切盒内的样品高度不一致而造成的接触面不吻合情况。

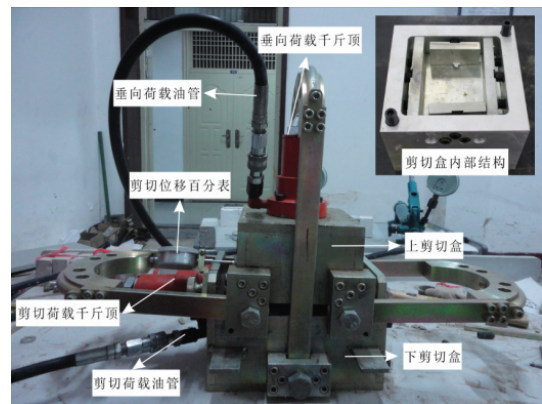


图1 直剪仪实物图

2. 试验样品制备

用于本次试验样品制备的模具尺寸为7cm×7cm×7cm, 其内部设计为规则锯齿形结构面, 每个模具中设计4个齿形起伏, 且分别设计5°、10°、15°、20°、25°、30°不同起伏角度的模具。为使样品的齿形起伏较光滑, 不影响直剪试验精度, 在模具中分别放置不同起伏度的金属模块。

异性结构面直剪试验分别采用石膏和混凝土2种类型的样品试件。其中石膏样品采用石膏粉与水为1: 0.6的配比, 混凝土则采用砂与水泥和水为2: 0.5: 1的配

比。为了不影响试验结果,利用人工筛选粗砂取得细颗粒的标准砂进行样品制备。最终制成不同齿形起伏角度样品试件如图2所示,其中A至F分别为5°至30°齿形起伏均匀变化。

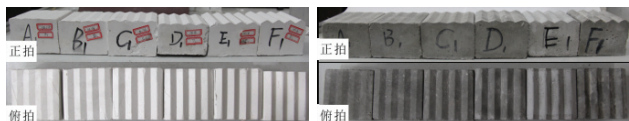


图2 异性结构面样品制备

3. 试验实施流程

试验前,将混凝土样品放置在剪切盒下盘,石膏样品放置在剪切盒上盘,将剪切盒放入直剪仪中,并使上、下盘样品试件的齿形起伏面完全接触。随后,将上盘剪切装置平稳地放置于已经完全吻合的上下剪切盒外侧,放置过程中调整水平位移百分表至合适位置。剪切盒布置完成后,调整横向剪切千斤顶凸起与水平“U”型金属插件内部凹槽相对,再将水平“U”型金属插件插入直剪仪两侧凹槽中,并将底端洞口相对,然后将两个螺栓插入孔内固定并保证垂向夹持千斤顶凸起与竖直“U”型金属插件下侧内部凹槽相对。

试验时,先在试件上施加法向荷载 N ,然后在水平方向逐渐增加水平剪力 T ,直至样品试件破坏。每次试验含4~6组异性结构面试件,分别在不同的法向应力 σ 作用下开展直剪试验,可获得与其对应的剪应力值 τ 。研究表明强度包络线不是严格的直线,但当施加的法向应力较小时,可认为其为直线,因此可以用库仑定律求取岩体的剪切强度参数 c 、 ϕ 值。

二、试验结果与分析

1. 剪切曲线特征分析

图3为不同正应力条件下5°、10°、15°、20°、25°、30°齿形异性结构面剪应力与剪切位移曲线。由曲线可知,齿形异性结构面的起伏角度越大,其变形规

律性越差;而齿形起伏角度小的结构面,其变形规律较明显,变形曲线较典型。由图中分析可知:

(1) 齿形起伏角度为5°, $\sigma=0.299184\text{MPa}$ 时,在剪切位移达到4mm前,每增加1mm,剪应力相应的增大25%;剪切位移达到8mm时达到峰值强度,然后不断下降,下降速率约为10%/mm。 $\sigma=0.416531\text{MPa}$ 时,剪切位移在9mm左右达到剪应力峰值,其后便缓慢下降,速率为6%/mm。

(2) 由起伏角度5°和10°曲线可知, $\sigma=0.299184\text{MPa}$ 时,剪切位移由6mm至12mm间,相同位移量下起伏角度10°的剪应力比5°的大55%左右。 $\sigma=0.416531\text{MPa}$ 时,剪切位移从3mm开始直至结束,起伏角度10°所对应的剪应力强度与5°所对应的剪应力强度差值越来越小,均逐渐趋于0.4MPa。

(3) 在齿形起伏角度为15°曲线中,当 $\sigma=0.76857\text{MPa}$ 时,剪切位移在6mm时达到剪应力峰值强度;位移量在3mm~6mm时,剪应力增长率为70%/mm,达到峰值强度后,开始缓慢下降并保持在35%/mm。

(4) 在齿形起伏角度为20°曲线中, $\sigma=0.768571\text{MPa}$ 比 $\sigma=0.416531\text{MPa}$ 更晚达到峰值强度, $\sigma=0.416531\text{MPa}$ 约在位移量6mm达到峰值,而 $\sigma=0.768571\text{MPa}$ 则是位移量至9mm时才达到峰值,且其峰值强度比 $\sigma=0.416531\text{MPa}$ 大15.39%。

(5) 在齿形起伏角度为25°曲线中,对比其他曲线可知,该角度下曲线较早的达到了剪应力峰值强度,其所对应的剪切位移约为其他起伏角度剪切位移的20%左右。而在齿形起伏角度为30°曲线中, $\sigma=0.416531\text{MPa}$ 时,达到剪切强度峰值的剪切位移比25°的小30%左右。

2. 剪切峰值强度特征分析

图4(a)为不同起伏角度下剪切强度峰值-正应力关系曲线。由图可知,相同正应力下,起伏角度越大,

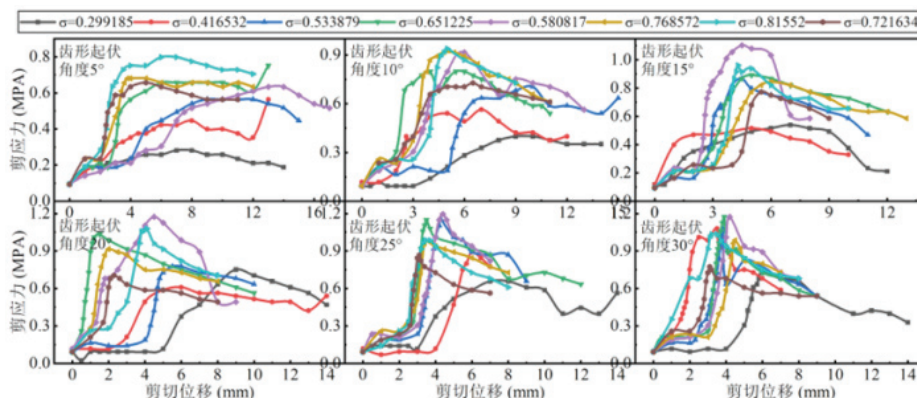


图3 不同正应力条件下各异性结构面剪应力与剪切位移曲线

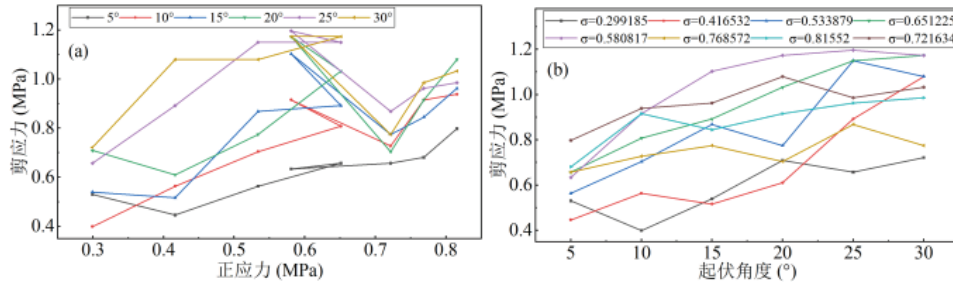


图4 剪切强度峰值与正应力和起伏角度关系曲线

剪切强度峰值越大，较大的起伏角度会增加结构面的不规则性，从而影响剪切强度；同一起伏角度下，正应力越大，剪强度峰值越大，表明正应力增加会提高剪切强度；正应力0.6MPa为临界点，超过0.6MPa时，抗剪强度峰值有所下降。

当异性结构面受到同一正应力作用时，其抗剪强度峰值与齿形起伏角度之间关系如图4(b)所示。图中可发现，同一角度下，正应力越大抗剪强度峰值越大，而高正应力条件下的剪切强度峰值的较大变化幅度，说明高正应力更容易激发结构面在不同角度下的强度差异；同一正应力下，随着起伏角度的增大，剪切峰值也有所增大，当剪切强度峰值达到最大值时，结构面的咬合力和摩擦力达到最佳匹配；起伏角度20°为临界角度，当超过20°时，随着正应力的增加，抗剪强度峰值有所下降或趋于平缓。

3. 讨论

由试验结果可知，起伏角度较小结构面的峰值强度与残余强度相差较小，正应力较小时也存在此现象，且起伏角度和正应力较小时，剪切结构面几乎均为齿形磨损破坏；但起伏角度为25°和30°时不再具有此现象，说明峰值强度与残余强度差别较小的情况仅存在于相对起伏角度和正应力较小时；且此时剪切位移-剪应力曲线较为平缓，相当于样品试件的塑性变形。另外，正应力越大，峰值强度出现的时间越早，曲线图形越陡，试验过程中，样品试件为剪断破坏而不是磨损破坏，此时的变形方式相当于脆性变形。

由试验分析可知，当正应力较大时，齿形结构面中会有一些软弱、薄弱的齿形直接破坏从而影响正常的剪切试验。联系实际可知，当外部有较大的荷载作用或者岩土体内部有较大的构造应力时，会引起岩层结构面的破坏，使其结构面的强度降低，从而导致其丧失原有的稳定性，造成工程事故或者自然灾害的发生。当齿形结

构面起伏角度较大时，齿形会因受到应力荷载而被挫断，从而影响了结构面的原有状态和原有性质。结合工程实例可知，若遇到结构面起伏角度较大情况时需要特别注意，起伏角度大的区域为不稳定区域，极易发生结构面的失稳破坏。

结论

本文通过直剪试验对异性结构面的抗剪强度特性进行了系统分析，发现起伏角度和正应力是影响抗剪强度的关键因素。通过对异性结构面直剪试验结果的分析，可得出以下结论：异性结构面的抗剪强度随法向应力的增加而增加，但存在临界角度（20°），超过此角度后强度可能下降；小角度异性结构面的剪切变形规律较为简单，呈线性关系，大角度结构面则表现出明显的剪切软化现象；实际工程中，应特别关注大角度异性结构面的稳定性，避免在高应力条件下发生失稳破坏；未来研究应进一步探讨不同材料组合和更广泛正应力范围内的抗剪强度变化规律，以更好地指导工程实际应用。

参考文献

- [1]周辉,程广坦,朱勇,等.大理岩规则齿形结构面剪切特性试验研究[J].岩土力学,2019,40(03):852-860.
- [2]田光辉,沈明荣,翟飞格,等.锯齿形结构面剪流变特性分析[J].工程勘察,2017,45(10):13-18+33.
- [3]陈曦.基于方向性粗糙度参数的节理峰值抗剪强度理论模型[J].岩土力学,2023,44(04):1075-1088.
- [4]崔志猛,邓志颖,张丙武,等.强度相近异性结构面的剪切特性[J].工业建筑,2022,52(06):133-139.DOI:10.13204/j.gjzq.21052304.
- [5]杨洁,荣冠,程龙,等.节理峰值抗剪强度试验研究[J].岩石力学与工程学报,2015,34(05):884-894.