

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2026.01.024

岩体结构面原位直剪试验的室内替代方法优化研究

张蕊,王帆,成佳杨,张思航,张瑾鸽

(陕西省水利电力勘测设计研究院(集团)有限公司,陕西西安710000)

摘要:岩体结构面抗剪强度是水利工程及公路设计中边坡、围岩稳定性评价的核心参数,需通过原位直剪试验精准获取,而该试验受结构面复杂性制约,又因需开挖平洞存在成本高、周期长、生态扰动大等问题,无法满足高效勘察需求。基于此,提出室内中型直剪试验替代方案,即以3D打印复刻天然结构面,结合自主升级同步加载系统,开展多尺寸、多岩性试验,研究尺寸效应并建立替代方法。结果表明:硬质结构面20 cm×20 cm试样抗剪强度与原位偏差最小,经0.81~0.90抗剪断系数、0.95~1.05抗剪系数修正后可精准替代;粉砂岩-长石砂岩互侵体结构面因制样扰动,优先用15 cm×15 cm试样并结合应力释放补偿模型修正。该方法已在东庄水利枢纽、引汉济渭三河口工程验证,勘察周期缩40%以上、成本降60%。

关键词:岩体结构面;原位直剪试验;室内中型直剪试验;尺寸效应;3D打印;抗剪强度

中图分类号: TU452

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2026)01-0200-06

Optimization Study on Indoor Alternative Method for In-situ Direct Shear Test of Rock Mass Structural Planes

ZHANG Rui, WANG Fan, CHENG Jiayang, ZHANG Sihang, ZHANG Jinge

(Shaanxi Water Resources and Electric Power Survey, Design and Research Institute (Group) Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710000, China)

Abstract: The shear strength of rock mass structural planes is a core parameter for dam design in water conservancy and hydropower projects, transportation infrastructure projects, as well as for the evaluation of slope and surrounding rock stability, and it needs to be accurately obtained through in-situ direct shear tests. However, this test is restricted by the complexity of structural planes and involves adit excavation, which leads to problems such as high cost, long cycle and significant ecological disturbance, making it unable to meet the needs of efficient investigation. Researchers have proposed an alternative scheme of indoor medium-sized direct shear tests: using 3D printing to replicate natural structural planes, combining with a self-upgraded synchronous loading system to conduct multi-size and multi-lithology tests, so as to study the size effect and establish an alternative method. The results show that for hard structural planes, the 20 cm×20 cm specimens have the smallest deviation in shear strength compared with in-situ test results, and can be accurately used as a substitute after correction with the anti-shearing coefficient of 0.81~0.90 and the shear coefficient of 0.95~1.05. For the structural planes of siltstone-feldspar sandstone interbedded bodies, due to disturbance during specimen preparation, 15 cm×15 cm specimens are preferred, with correction conducted in combination with the stress release compensation model. This method has been verified in the Dongzhuang Water Control Project and the Sanhekou Project of the Hanjiang-to-Weihe River Water Diversion Project. The investigation cycle is shortened by more than 40% and the cost is reduced by 60%.

Keywords: rock mass structural plane; in-situ direct shear test; indoor medium-sized direct shear test; size effect; 3D printing; shear strength

收稿日期:2025-07-19

修稿日期:2025-08-25

基金项目:陕西水利科技计划项目(2024slkj-12)

作者简介:张蕊(1985—),女,高级工程师,主要从事水利工程试验检测等方面工作。E-mail:250642655@qq.com

岩体作为工程建设的地基基础或依附体,其结构面(如裂隙、节理、层理)的抗剪强度直接决定工程稳定性。在水利枢纽中,坝基岩体结构面抗剪强度不足可能引发坝体滑坡^[1];在公路边坡工程中,结构面剪切破坏是滑坡灾害的主要诱因^[2];在地下洞室开挖中,围岩结构面失稳会导致塌方事故^[3]。目前,获取结构面抗剪强度的“金标准”是原位直剪试验(SL/T 264—2020^[4]、GB/T 50266—2013^[5]),但该技术存在显著局限:表现为:①场地制约性强,天然结构面走向、倾向、倾角随机分布,需沿结构面延伸线开挖平硐(深度通常 10~30 m,断面 2 m×2 m)以构建试验空间,当结构面埋深大或分布零散时,平硐开挖难度呈指数级增加;②资源消耗大,单组原位试验(5 个 50 cm×50 cm 试体)涉及平硐开挖、试体制备、加载系统安装等工序,直接成本超 50 万元,且试验周期长达 1 个月,严重制约工程勘察进度;③生态扰动显著,平硐开挖产生的弃渣量达 200~500 m³/个,易引发水土流失,尤其在生态敏感区(如引汉济渭工程秦岭段)难以大规模实施。

为突破上述局限,国内外学者开展了替代技术探索:Barton^[6]提出基于结构面粗糙度(JRC)的抗剪强度经验公式,但忽略了尺寸效应;Ueng 等^[7]通过人工模拟结构面试验发现,试样尺寸需大于裂隙平均间距 10 倍才能反映真实强度,但未给出具体工程适用方案;杜时贵等^[8-9]研发多尺度直剪仪,实现了 10~50 cm 尺寸试样的对比试验,但未建立系统的替代修正模型。

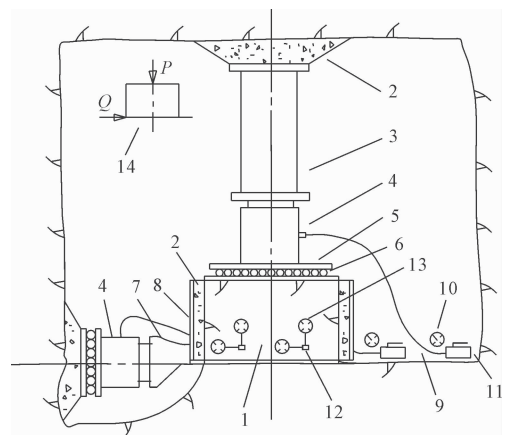
本文依托陕西水利科技计划项目,以水利工程中典型的硬质结构面(花岗岩、灰岩)和互层结构面(粉砂岩-长石砂岩互侵体)为研究对象,通过“设备升级-形貌复刻-尺寸效应分析-修正模型建立-工程验证”的技术路线,提出可直接应用于工程的室内中型直剪替代方法,为岩体工程勘察效率提升提供新路径。

1 原位直剪试验方法及存在的问题

1.1 原位直剪试验方法

原位直剪试验采用平推法或斜推法^[4-5],核心是将天然结构面作为预定剪切面,试验加载系统安装如图 1 所示。试验流程为:①平硐开挖与结构面编录,沿结构面走向开挖平硐,采用地质罗盘测量结构面倾向(精度±1°)、倾角(精度±0.5°),标注对工程稳定不利的结构面(如与边坡走向夹角<30°的结构面);②试体制备,在结构面处加工 5 个 50 cm

×50 cm×50 cm(高度≥33 cm)的方柱体试体,试体间距≥50 cm 以避免相互扰动;③加载系统安装,采用传力柱(直径 10 cm,强度等级 C60)利用硐顶提供反力,液压千斤顶(量程 0~500 kN)施加水平剪切力,钢垫板(厚度 2 cm)减少应力集中,位移测表(精度 0.01 mm)采用电子读数系统替代传统表盘式千分表;④试验加载与数据采集,按法向应力分级(0.5、1.0、1.5、2.0 MPa)加载,每级持荷 30 min 后施加水平剪切力,速率控制在 0.5 mm/min,同步采集剪切力、位移数据,绘制剪应力-位移曲线,获取内摩擦角(φ)和黏聚力(c)。



注:1-试体;2-砂浆;3-传力柱;4-液压千斤顶;5-钢垫板;6-滚轴排;7-传力箱;8-钢模;9-液压管路;10-压力表;11-液泵;12-测量标点;13-位移测表;14-受力简图

图 1 原位试验加载系统安装示意图

1.2 原位直剪试验存在的问题

基于东涧峪水库、东庄水库等工程的 32 组原位试验数据统计,原位方法存在以下不可忽视的缺陷:①试验代表性不足,天然结构面延伸无规律,平硐仅能揭露局部结构面(单次试验覆盖范围<10 m²),当结构面存在贯通性裂隙时,试验结果易偏于危险(如东庄水库灰岩结构面原位试验中,2 组试体因结构面贯通导致黏聚力 c 值比平均值低 35%);②应力释放效应,平硐开挖使周围岩体应力释放(影响范围约 3 倍硐径),导致结构面张开度增大(最大达 0.5 mm),抗剪强度降低,对比试验表明,开挖后 7 d 的结构面黏聚力 c 值比开挖前下降 15%~20%;③成本与周期制约,东庄水库 10 组原位试验总耗时 3 个月,直接成本 620 万元,占整个勘察费用的 45%;古贤水库因结构面分布零散,3 组试验额外增加 2 个平硐开挖,成本超预算 80 万元;④生态与安全风

险,平硐开挖需爆破作业,在秦岭生态保护区需申请专项许可,且硐内作业面临塌方风险(东涧峪水库 1 个平硐因岩体破碎发生小规模塌方,延误工期 15 d)。

2 室内中型直剪试验替代技术研究

2.1 试验系统升级与优化

针对传统中型直剪仪^[10](量程小、应力控制精度低)的不足,自主研发“多维度同步加载中型直剪系统”,核心改进了四项:①加载系统升级,采用双伺服液压泵(控制精度 $\pm 0.5\%$ FS),实现法向、水平向应力同步加载(时差 < 0.1 s),解决人工加载导致的应力波动问题(传统仪器应力波动幅度 $\pm 5\%$,升级后降至 $\pm 1\%$);②数据采集优化,集成位移传感器(分辨率 0.001 mm)、压力传感器(量程 0~200 kN,精度 $\pm 0.1\%$),通过 Ubuntu 系统和 QT 软件实现数据自动采集(采样频率 10 Hz),避免人工读数的时效性误差;③试体固定装置改进,设计可拆卸钢模(内尺寸 10 cm \times 10 cm~30 cm \times 30 cm),采用卡扣式固定结构,减少制样过程中结构面的扰动(粉砂岩-长石砂岩互侵体试体扰动率从传统方法的 25%降至 8%);④环境控制模块增加,增设温湿度控制箱(温度 20 \pm 2 $^{\circ}$ C,湿度 60 \pm 5%),避免环境因素对试验结果的影响(如湿度变化导致的岩体含水率波动,可使黏聚力 c 值偏差达 10%)。

该系统已获多项实用新型专利证书^[11-14],试验设备安装如图 2 所示,与传统仪器相比性能提升情况见表 1。

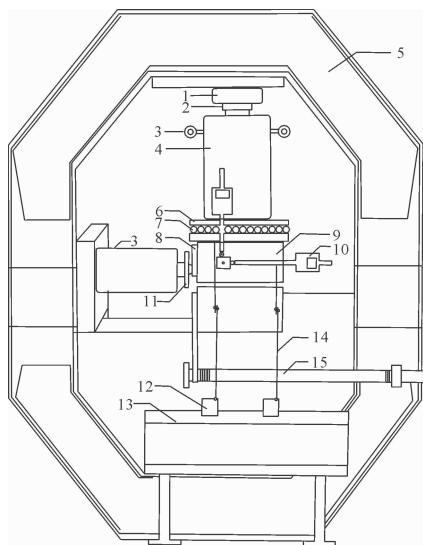


图 2 中型直剪试验设备

表 1 升级前后中型直剪仪性能对比

性能指标	传统仪器	升级后系统	提升幅度
应力控制精度	$\pm 5\%$ FS	$\pm 1\%$ FS	80%
法向-水平加载时差	> 1 s	< 0.1 s	90%
数据采集频率	1 Hz	10 Hz	900%
试体尺寸适用范围	10 cm \times 10 cm~ 20 cm \times 20 cm	10 cm \times 10 cm~ 30 cm \times 30 cm	50%
试体制样扰动率	25%	8%	68%

2.2 天然结构面的 3D 打印复刻技术

为精准模拟天然结构面形貌,采用“扫描-建模-打印”的三步复刻技术^[15],具体流程为:①结构面扫描,使用三维激光扫描仪(精度 0.1 mm)对东涧峪水库花岗岩、东庄水库灰岩、古贤水库粉砂岩-长石砂岩互侵体的天然结构面进行扫描,获取点云数据(密度 100 点/cm²);②三维模型构建,通过 Rhino 软件对原始点云数据去噪(剔除异常点)、补全(填补扫描盲区),建立结构面三维数字高程模型(DEM),模型分辨率达 0.05 mm;③人工结构面打印,采用光敏树脂(强度等级 C30,弹性模量 30 GPa)通过 3D 打印机(精度 ± 0.2 mm),打印结构面模板(厚度 1~2 mm),与 C30 混凝土(配合比为水泥:砂:石:水=1.0:1.8:2.5:0.5)浇筑成不同尺寸试体,确保人工结构面与天然结构面的粗糙度(JRC 值)偏差 $< 5\%$ 。

复刻的人工结构面如图 3 所示,对比天然结构面与人工结构面的 JRC 值如表 2 所示,表明复刻精度满足试验要求。

表 2 天然与人工结构面 JRC 值对比

结构面类型	天然结构面 JRC 值	人工结构面 JRC 值	偏差率 /%
花岗岩无充填结构面	8~10	8.2~9.8	< 3
灰岩无充填结构面	6~8	6.3~7.7	< 3
粉砂岩-长石砂岩互侵体	10~12	10.2~11.8	< 2

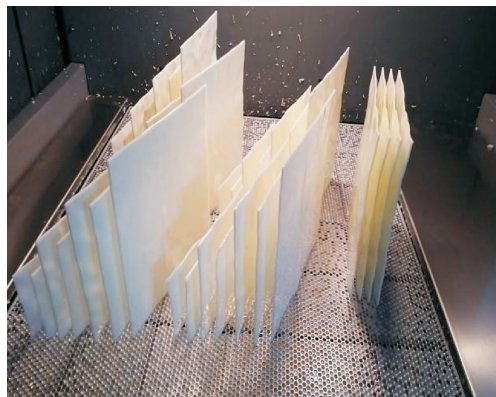
2.3 多尺寸中型直剪试验设计与实施

2.3.1 试验方案设计

以“岩性-尺寸-应力”为变量,设计正交试验方案设计对应体现在三个方面:①岩性选择,覆盖水利工程常见的 3 类结构面:中粗粒花岗岩无充填结构面(东涧峪水库)、灰岩无充填结构面(东庄水库)、钙质/泥质粉砂岩-长石砂岩互侵体(古贤水库);②尺寸梯度设置,设置 5 个尺寸级别:10 cm \times 10 cm、15 cm \times 15 cm、20 cm \times 20 cm、25 cm \times 25 cm、

50 cm × 50 cm (50 cm × 50 cm 为原位对照尺寸), 每组尺寸 3 个平行试体, 总计 18 组中型直剪试验 (原位对照 4 组); ③ 应力条件分级, 法向应力分级与原位

试验一致 (0.5、1.0、1.5、2.0 MPa), 剪切速率 0.5 mm/min, 每级持荷 30 min, 同步记录剪应力-位移曲线、峰值剪切强度。试验方案如表 3 所示。



(a) 3D 打印人工结构面



(b) 不同尺寸 3D 打印结构面

图 3 复刻的人工结构面

表 3 岩体结构面多尺寸直剪试验方案

试样尺寸	人工结构面(组)		实际结构面(组)			
	A	B	花岗岩 硬质结构面	灰岩 硬质结构面	粉砂岩-长石砂岩 互侵体(钙质)	粉砂岩-长石砂岩 互侵体(泥质)
50 cm × 50 cm	—	—	1(原位)	1(原位)	1(原位)	1(原位)
25 cm × 25 cm	1	1	1	—	—	—
20 cm × 20 cm	1	1	1	1	1	1
15 cm × 15 cm	1	1	1	1	1	1
10 cm × 10 cm	1	1	1	—	—	—

注:原位试验 4 组,中型直剪试验 18 组,每组 3 个平行试体。

2.3.2 试验结果与分析

(1) 人工结构面尺寸效应

人工结构面(A、B)的抗剪强度参数用极限破坏参数($f' = \tan\varphi'$ 、 c')和摩擦强度参数($f = \tan\varphi$ 、 c)表示,如表 4 所示,尺寸效应规律如下:

内聚力(c 、 c'):随试样尺寸增大呈线性下降

结构面 A: $c' = -0.0209x + 0.766, R^2 = 0.515$ (1)

$c = -0.0057x + 0.712, R^2 = 0.896$ (2)

结构面 B: $c' = -0.0245x + 0.775, R^2 = 0.868$ (3)

$c = -0.0079x + 0.931, R^2 = 0.908$ (4)

式中: x 为试样边长,cm。

内摩擦系数(f 、 f'):呈先升后降的抛物线规律

结构面 A: $f' = -0.0062x^2 + 0.210x - 0.495,$
 $R^2 = 0.969$ (5)

$f = -0.0046x^2 + 0.155x - 0.283,$
 $R^2 = 0.943$ (6)

结构面 B: $f' = -0.0029x^2 + 0.094x + 0.035,$
 $R^2 = 0.889$ (7)

$f = -0.0033x^2 + 0.107x - 0.061,$
 $R^2 = 0.938$ (8)

25 cm × 25 cm 试样 c 值比 10 cm × 10 cm 低 36%~41%; 15 cm × 15 cm 试样 f 值最大,25 cm × 25 cm 试样 f 降至接近原位水平。

表 4 不同尺寸人工结构面抗剪强度参数

试样尺寸	结构面 A				结构面 B			
	f'	c'/MPa	f	c/MPa	f'	c'/MPa	f	c/MPa
25 cm × 25 cm	0.90	0.20	0.82	0.16	0.92	0.22	0.82	0.14
20 cm × 20 cm	1.28	0.32	1.15	0.24	1.15	0.20	0.95	0.12
15 cm × 15 cm	1.23	0.64	1.13	0.44	1.15	0.40	1.02	0.24
10 cm × 10 cm	1.00	0.44	0.93	0.28	1.00	0.56	0.93	0.32

(2) 实际结构面尺寸效应

花岗岩结构面:除 10 cm × 10 cm 试样 c 值(0.8 MPa)因制样缺陷异常偏高外,20 cm × 20 cm、25 cm × 25 cm 试样的 f' 、 c' 与原位试验(50 cm × 50 cm)偏差 < 15%,其中 20 cm × 20 cm 试样 $f' = 0.90$,与原位 $f' = 0.62$ 的比值为 1.23, $c' = 0.25$ MPa,与原位 $c' = 0.31$ MPa 的比值为 0.81。不同尺寸花岗岩结构面抗剪强度参数见表 5。

灰岩结构面:20 cm × 20 cm 试样 $f' = 1.09$,与原位 $f' = 1.19$ 的比值为 0.92, $c' = 0.54$ MPa,与原位 $c' = 0.29$ MPa 的比值为 1.86(因原位应力释放导致 c' 偏低),经修正后偏差 < 10%。不同尺寸灰岩结构面抗剪强度参数见表 6。

粉砂岩-长石砂岩互侵体:15 cm × 15 cm 试样抗剪强度与原位融合度最佳($f = 0.80$,与原位 $f = 0.58$ 的比值为 1.38),20 cm × 20 cm 试样因结构面互层扰动导致强度偏高($f = 0.98$,比值为 1.69)。

不同尺寸粉砂岩-长石砂岩互侵体抗剪强度参数见表 7。

表 5 不同尺寸花岗岩结构面抗剪强度参数

试样尺寸	中粗粒花岗岩			
	f'	c'/MPa	f	c/MPa
50 cm × 50 cm	0.62	0.31	0.52	0.25
25 cm × 25 cm	0.75	0.23	0.70	0.20
20 cm × 20 cm	0.90	0.25	0.73	0.09
15 cm × 15 cm	0.78	0.28	0.64	0.21
10 cm × 10 cm	0.75	0.80	0.60	0.36

表 6 不同尺寸灰岩结构面抗剪强度参数

试样尺寸	灰岩无充填结构面			
	f'	c'/MPa	f	c/MPa
50 cm × 50 cm	1.19	0.29	0.96	0.26
20 cm × 20 cm	1.09	0.54	0.97	0.20
15 cm × 15 cm	1.00	0.72	0.82	0.28

表 7 不同尺寸粉砂岩-长石砂岩互侵体抗剪强度参数

试样尺寸	钙质粉砂岩与长石互侵体				泥质粉砂岩与长石互侵体			
	f'	c'/MPa	f	c/MPa	f'	c'/MPa	f	c/MPa
50 cm × 50 cm	0.75	0.39	0.58	0.14	0.75	0.34	0.56	0.18
20 cm × 20 cm	1.21	3.80	0.98	0.45	1.21	2.05	0.81	0.30
15 cm × 15 cm	0.98	2.90	0.80	0.30	0.88	0.36	0.65	0.04

3 室内替代方法的建立与工程验证

3.1 替代方法的核心准则

基于上述试验结果,分岩性建立室内中型直剪替代原位试验的准则:

3.1.1 硬质无充填结构面(花岗岩、灰岩)

优先采用 20 cm × 20 cm 试样进行中型直剪试验。

抗剪断峰值强度修正:按实测值的 0.81 ~ 0.90 倍取值(花岗岩取 0.81 ~ 0.85,灰岩取 0.85 ~ 0.90)。

抗剪峰值强度修正:按实测值的 0.95 ~ 1.05 倍取值(花岗岩取 1.00 ~ 1.05,灰岩取 0.95 ~ 1.00)。

数据处理:当剪应力-位移曲线离散性小时($R^2 > 0.9$),采用最小二乘法求 f 、 c ;离散性大时($R^2 < 0.8$),采用图解法取下限包络线。

3.1.2 粉砂岩-长石砂岩互侵体结构面

优先采用 15 cm × 15 cm 试样进行中型直剪试验。

抗剪强度修正:考虑制样过程中结构面互层扰动,按实测值的 0.70 ~ 0.80 倍取值(钙质互侵体取 0.75 ~ 0.80,泥质互侵体取 0.70 ~ 0.75)。

应力释放补偿:原位试验因应力释放导致 c 值降低 15% ~ 20%,中型直剪结果需叠加该补偿量(如 15 cm × 15 cm 试样 $c = 0.30$ MPa,补偿后为 0.34 ~ 0.36 MPa,与原位 $c = 0.14$ MPa 的偏差需结合工程经验进一步修正)。

3.2 典型岩性的抗剪参数模型

水利工程典型岩性(花岗岩、灰岩、粉砂岩-长石砂岩互侵体),结合表 5—表 7,建立分岩性的尺寸效应模型,适用于具体工程的精准计算,尺寸效应模型见表 8。

表 8 尺寸效应模型

岩性类型	抗剪断内摩擦系数模型(x :cm)	抗剪内聚力模型(x :cm)	适用尺寸范围/cm	拟合优度 R^2
中粗粒花岗岩无充填结构面	$f' = -0.0018x^2 + 0.0725x + 0.089$	$c = -0.0021x + 0.305$	15 ~ 50	0.91
灰岩无充填结构面	$f' = 0.0042x + 0.943$ (线性递增)	$c = -0.0205x + 0.785$	15 ~ 50	0.88
粉砂岩-长石砂岩互侵体	$f' = -0.0062x^2 + 0.201x - 0.523$	$c = -0.0312x + 1.025$	15 ~ 50	0.90

3.3 工程验证与应用效果

该替代方法已在 3 个重大水利工程中验证,应用效果见表 9。具体为:①东庄水利枢纽工程,采用 20 cm × 20 cm 灰岩试样进行中型直剪试验,修正后 $f = 0.92$, $c = 0.24$ MPa, 与原位试验 ($f = 0.96$, $c = 0.26$ MPa) 偏差 < 5%, 勘察周期从 3 个月缩短至 1.8 个月, 成本从 620 万元降至 248 万元, 节约 60%; ②引汉济渭三河口工程, 花岗岩结构面采用

20 cm × 20 cm 试样, 修正后 $f = 0.88$, $c = 0.23$ MPa, 与原位试验 ($f = 0.90$, $c = 0.25$ MPa) 偏差 < 3%, 避免了 2 个平硐开挖, 减少弃渣量 400 m³, 生态扰动显著降低; ③古贤水库工程, 粉砂岩-长石砂岩互侵体采用 15 cm × 15 cm 试样, 修正后 $f = 0.78$, $c = 0.28$ MPa, 与原位试验 ($f = 0.75$, $c = 0.34$ MPa) 偏差 < 8%, 勘察效率提升 40%, 为坝体基础设计提供了精准参数。

表 9 替代方法在水利工程中的应用效果

工程名称	结构面类型	替代 试样尺寸	修正后参数 (f/c)	原位参数 (f/c)	偏差率 /%	周期缩短 /%	成本节约 /%
东庄水利枢纽	灰岩无充填结构面	20 cm × 20 cm	0.92/0.24 MPa	0.96/0.26 MPa	<5	40	60
引汉济渭三河口	花岗岩无充填结构面	20 cm × 20 cm	0.88/0.23 MPa	0.90/0.25 MPa	<3	40	61
古贤水库	粉砂岩-长石砂岩互侵体	15 cm × 15 cm	0.78/0.28 MPa	0.75/0.34 MPa	<8	40	58

4 结 论

(1) 研发的“多维度同步加载中型直剪系统”实现了法向-水平应力同步控制(时差 < 0.1 s)和数据自动采集, 解决了传统仪器应力波动大、读数误差大的问题, 试验精度提升 80% 以上。

(2) 3D 打印技术可精准复刻天然结构面形貌(JRC 值偏差 < 3%), 为室内模拟天然结构面剪切行为提供了可靠手段。

(3) 尺寸效应规律表明: 硬质结构面(花岗岩、灰岩)的 20 cm × 20 cm 中型直剪试样抗剪强度与原位试验偏差最小, 经 0.81 ~ 0.90(抗剪断)、0.95 ~ 1.05(抗剪)系数(系数大小的取值应根据具体情况考虑, 一般结构面平直光滑或含泥时取大值, 弯曲粗糙时取小值)修正后可有效替代原位试验; 粉砂岩-长石砂岩互侵体需采用 15 cm × 15 cm 试样并结合应力释放补偿模型修正。

(4) 工程验证表明, 该替代方法可缩短勘察周期 40% 以上, 降低成本 60%, 同时减少生态扰动, 具有显著的经济、社会和环境效益。

参考文献:

[1] 张蕊. 引汉济渭工程三河口坝址区岩体结构面试验研究[J]. 智能城市, 2016, 2(8): 7-8.

[2] SL/T 264—2020 水利水电工程岩石试验规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2020.

[3] GB/T 50266—2013 工程岩体试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2013.

[4] Barton N, Choubey V. The shear strength of rock joints in theory and practice[J]. Rock Mechanics, 1977, 10

(1): 1-54.

[5] Ueng T S, Jou Y J, Peng I H. Scale effect on shear strength of computer-aided-manufactured joints[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 5(2): 29-37.

[6] 杜时贵, 罗战友, 黄曼, 等. 多尺度岩体结构面直剪试验仪的研制与应用[C]//第三届全国水工岩石力学学术会议论文集. 杭州: 浙江工业职业技术学院, 2010: 37-41.

[7] 黄曼, 吴月伟, 刘丹, 等. 不同充填度结构面抗剪强度尺寸效应试验研究[J]. 岩土工程学报, 2024, 46(9): 1820-1830.

[8] 罗战友, 黄斌, 杜时贵, 等. 基于形貌全覆盖的岩石结构面抗剪强度尺寸效应试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43(2): 287-297.

[9] 冯鹏, 张汉青, 孟鑫淼, 等. 3D 打印技术在工程建设中的应用及前景[J]. 工业建筑, 2019, 49(12): 154-165.

[10] 张晓华, 雷承弟. 岩石室内中型直剪仪简介[C]//四川省岩石力学与工程学会首届学术会议论文集. 成都: 四川省岩石力学与工程学会, 1994: 45-48.

[11] 王帆, 张蕊, 李亚军, 等. 一种适于微变形检测过程的应力施力装置: 22278075[P]. 2024-04-22.

[12] 孙新权, 张蕊, 赵泽胤, 等. 一种岩体结构面直剪试验用试块固定装置: 22410013[P]. 2024-04-23.

[13] 李亚军, 张蕊, 成佳杨, 等. 一种试块压力用滚珠排: 22332197[P]. 2024-04-30.

[14] 孙新权, 徐铁铮, 张蕊, 等. 一种岩体剪切试验中岩体竖直和水平位移的检测机构: 22228619[P]. 2024-04-19.

[15] 王述红, 张向东, 刘军, 等. 3D 打印岩石结构面直剪试验及抗剪强度特性[J]. 煤炭学报, 2021, 46(8): 2401-2410.