

压剪条件下 FRP-混凝土界面黏结性能试验研究

蒋中明^{1,2}, 肖喆臻¹, 袁振¹, 贺松涛¹, 杨雪¹

(1. 长沙理工大学水利与海洋工程学院, 湖南长沙 410114;

2. 长沙理工大学水沙科学与水灾害防治湖南省重点实验室, 湖南长沙 410114)

摘要:为深入认识地下储气库 FRP-混凝土界面在压剪条件下的黏结性能,采用室内直剪试验研究了 FRP-混凝土界面在法向应力、混凝土表面粗糙度、胶层厚度和混凝土强度等 4 种影响因素变化条件下的黏结性能变化规律。结果表明:在压剪条件下,FRP-混凝土界面主要产生混凝土表层的剥离破坏;界面剪应力与位移之间呈现出显著的非线性变化特征;界面的剪切强度和刚度随着界面法向应力、混凝土表面粗糙度、胶层厚度和混凝土强度的增大而增大;摩尔-库仑强度准则可用于描述界面在压剪条件下的屈服破坏行为。

关键词:FRP-混凝土界面;压剪条件;混凝土表面粗糙度;胶层厚度;界面本构模型

中图分类号:TU398

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2025)02-0024-07

Experimental study on bond behavior of FRP-concrete interface under compression and shear conditions//JIANG Zhongming^{1,2}, XIAO Zhezhen¹, YUAN Zhen¹, HE Songtao¹, YANG Xue¹(1. School of Hydraulic and Ocean Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China; 2. Key Laboratory of Water-Sediment Sciences and Water Disaster Prevention of Hunan Province, Changsha 410114, China)

Abstract: In order to further understand the bond behavior of FRP-concrete interface in underground gas storage under combined compression and shear conditions, an indoor direct shear test was conducted to study the bond performance of the FRP-concrete interface under varying influencing factors, including normal stress, concrete surface roughness, adhesive thickness and concrete strength. The results show that the FRP-concrete interface is mainly characterized by debonding failure of the concrete surface under the combined compression and shear conditions. A significant nonlinear relationship exists between the interfacial shear stress and displacement. The strength and stiffness of the interface increase with the increase of normal stress, concrete surface roughness, adhesive thickness and concrete strength. The Mohr-Coulomb criterion can be used to describe the yield failure behavior of the interface under compression and shear conditions.

Key words: FRP-concrete interface; compression and shear conditions; surface roughness of concrete; adhesive thickness; interfacial constitutive model

压缩空气储能(compressed air energy storage, CAES)技术是一种将电能转化为压缩空气内能,并在电网负荷高峰期释放压缩空气推动汽轮机发电的大规模物理储能技术,是消除风能和太阳能等清洁能源生产的电力对电网稳定性的不利影响,提高能源利用率的有效途径之一,近年来备受国内学者和产业界关注。而建设大规模 CAES 地下储气库的关键之一是保证地下储气库密封性能。

纤维增强复合材料(fiber reinforced polymer, FRP)因具有良好的防气渗及力学性能^[1],可作为 CAES 地下储气库的密封材料与混凝土衬砌共同形

成 FRP-混凝土衬砌密封结构^[2-5],目前相关研究成果主要集中在 FRP 材料的气渗性和力学特性等方面,而对于密封层界面性质及其失效破坏机制的研究较少。地下储气库在压缩空气压力的作用下会造成密封层界面的剥离开裂,使防渗材料层与混凝土衬砌基层之间出现脱空区。脱空区的大面积出现将导致密封结构在循环内、外压力作用下产生破坏,最终导致密封性能失效。为确保 FRP-混凝土衬砌密封结构功能的正常发挥,必须保证 FRP 与混凝土衬砌密封结构层间的界面(FRP-混凝土界面)黏结性能良好。目前对 FRP-混凝土界面黏结性能的研究

基金项目:国家自然科学基金项目(52178381);长沙理工大学研究生科研创新项目(CXCLY2022073);中国电建集团核心攻关项目(DJ-HXGG-2023-09)

作者简介:蒋中明(1969—),男,教授,博士,主要从事岩土工程及压气储能研究。E-mail:zzmjjiang@163.com

已有大量成果,如殷雨时等^[6]和郭诗惠等^[7-8]采用单剪和双剪试验分别研究了粗糙度和胶层厚度对FRP-混凝土界面黏结性能的影响,Alam等^[9-10]采用双剪试验研究了复合受力状态下界面的性能,黄俊豪等^[11-12]通过梁式试验研究了正应力和剪应力耦合下的界面剥离效应。但这些试验成果存在局限性,不足以揭示FRP作为地下储气库密封层时FRP-混凝土界面的变形破坏机理,忽略了压应力对FRP-混凝土界面黏结性能的影响,而CAES地下储气库工程中,FRP-混凝土界面主要处于压剪复合应力状态,界面压应力对黏结性能的影响不可忽略,且FRP作为密封层时的厚度远大于作为加固材料时的厚度。为此,本文参考岩石-混凝土界面试验方法^[13],采用直剪试验研究压剪状态下FRP-混凝土界面黏结性能变化规律,以期全面认识CAES地下储气库密封结构界面的受力特性提供参考。

1 试验设计与方法

1.1 试验方案

试验主要考虑界面法向应力、混凝土表面粗糙度(以下简称“粗糙度”)、胶层厚度和混凝土强度等4种影响因素。完整试件尺寸为100 mm×100 mm×70 mm,其中混凝土基材的尺寸为100 mm×100 mm×50 mm,FRP板的尺寸为100 mm×100 mm×20 mm。

通过在混凝土表面预制不同数量的等腰直角三角形凹槽来模拟不同粗糙度,得到6种粗糙度的混凝土试件(图1),粗糙度指标取值如表1所示。

表1 试件粗糙度

试件	粗糙度	轮廓线实际长度/mm	轮廓线投影长度/mm
试件1	1.00	100.00	100.00
试件2	1.09	109.17	100.00
试件3	1.18	118.34	100.00
试件4	1.23	122.93	100.00
试件5	1.32	132.10	100.00
试件6	1.46	145.86	100.00

试验方案如表2所示,其中方案A主要考虑不同界面法向应力下的界面力学性能变化规律,共15个试件;方案B研究粗糙度对界面黏结性能的影响,共18个试件;方案C研究胶层厚度变化对界面黏结性能的影响,共12个试件;方案D考虑混凝土强度变化对界面黏结性能的影响,共9个试件。

表2 试验方案

试验方案	界面法向应力/MPa	粗糙度	胶层厚度/mm	混凝土强度等级
A	1,2,3,6,10	1.00	1.0	C30
B	1.0	1.00,1.09,1.18,1.23,1.32,1.46	1.0	C30
C	1.0	1.00	1.0,1.2,1.5,2.0	C30
D	1.0	1.00	1.0	C30,C40,C50

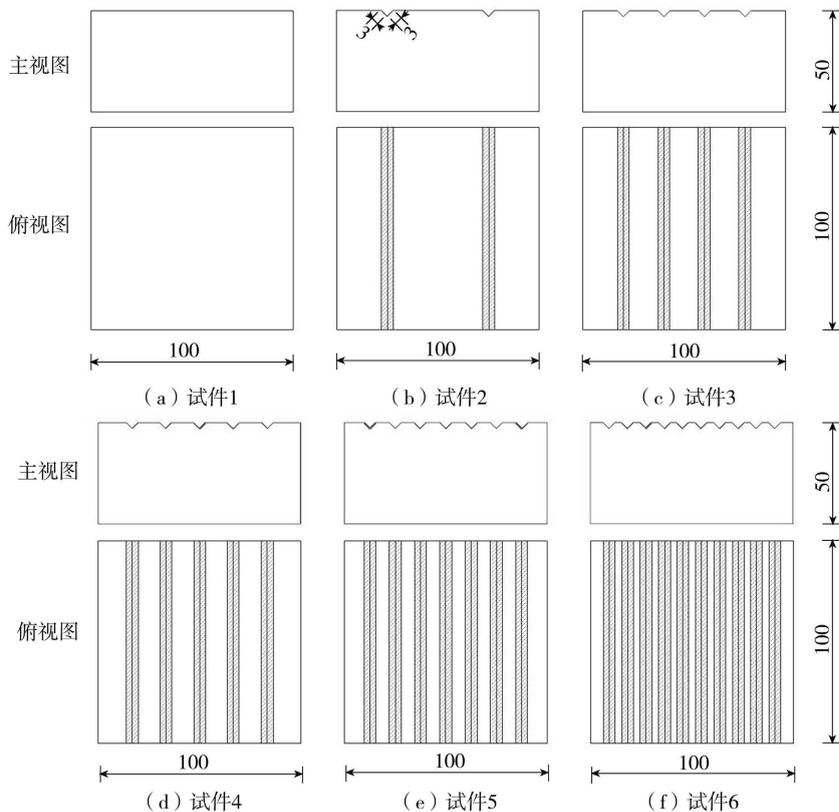


图1 不同粗糙度的混凝土试件(单位:mm)

1.2 试件制备

试件混凝土采用 P·O 42.5 普通硅酸盐水泥、中砂和碎石(粒径为 5~20 mm)拌和后成型,不同设计强度等级的混凝土配合比见表 3。混凝土试件在标准条件下养护 28 d,参照 GB/T 50081—2019《混凝土物理力学性能试验方法标准》进行测试,其材料力学性能指标见表 4,混凝土强度满足 C30、C40 和 C50 强度等级要求。FRP 采用 G10 型玻璃钢板,混凝土与 FRP 之间的黏结剂采用 CH-1A 型环氧树脂胶,FRP 和环氧树脂胶材料力学性能指标见表 4。FRP-混凝土界面试件制作完成并待黏结剂固化 24 h 后在室温条件下养护 7 d。

表 3 混凝土配合比 单位:kg/m³

混凝土强度等级	水泥	砂	石	水	减水剂
C30	380	680	1159	207	1.035
C40	450	694	1018	225	1.125
C50	488	562	1167	243	1.215

表 4 材料力学性能

材料	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa
C30 混凝土	33.55	2.73	30.92
C40 混凝土	44.19	3.17	33.50
C50 混凝土	50.24	3.41	34.59
FRP		344.00	5.60
环氧树脂	91.30	46.70	3.21

1.3 试验设备

试验用直剪仪为 DZYTJLZJ-150 型压缩直剪仪。该直剪仪最大水平与垂直荷载均为 1 500 kN,精度为 0.1 kN;最大水平与垂直位移行程均为 100 mm,精度为 0.001 mm。仪器可实时记录作用在试件上的应力和位移。

试验步骤如下:①试件安装。将试件放置在上、下剪盒间,FRP 板放置于下剪盒中,并在下剪盒处放置相应高度的铸铁垫块及铁片,确保在剪切过程中 FRP-混凝土界面始终处于剪切面上。试件安装及剪切面如图 2 所示。②施加法向荷载。通过电脑控制面板设置预定法向荷载值,直至法向位移和应力达到稳定状态。③施加水平荷载。采用位移控制

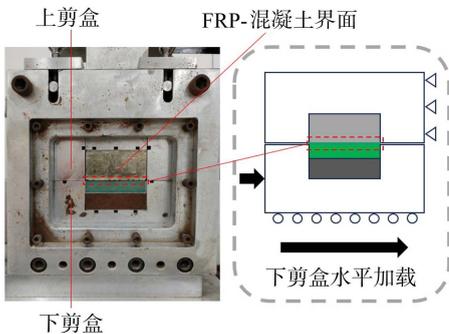


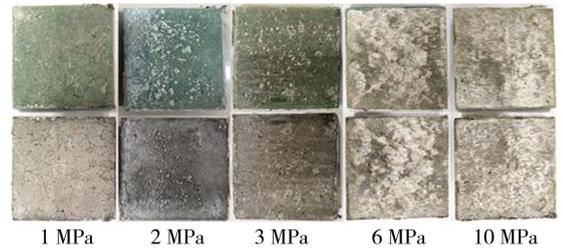
图 2 试件安装及剪切面示意图

方式施加水平荷载,加载速率为 0.2 mm/min。④试验终止。在试件界面完全破坏且水平荷载达到稳定时终止试验。

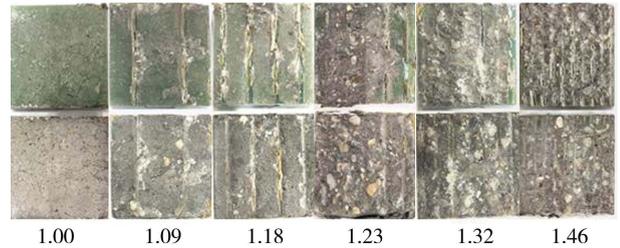
2 试验结果与分析

2.1 界面破坏形态及分析

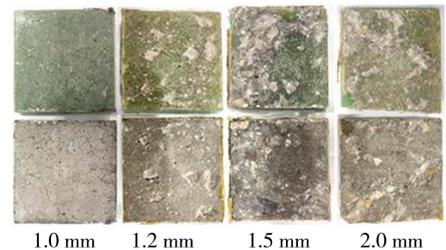
图 3 为不同影响因素条件下 FRP-混凝土界面的剪切破坏形态。由图 3(a)可知,界面法向应力较低时界面破坏主要表现为胶层与混凝土界面的分离,而界面法向应力较高时主要表现为混凝土表层砂浆的剥离破坏,随着界面法向应力的增大,界面破坏时混凝土表层浆体剥离程度越来越严重,这显著增大了界面破坏面的粗糙度,并使得界面剪切过程中的摩擦力也随之增大。因此界面法向应力的升高有助于提高界面的黏结性能。由图 3(b)可知,界面破坏的位置均出现在混凝土一侧,界面均表现为混凝土表层砂浆的剥离破坏,且粗糙度越高,剥离得越



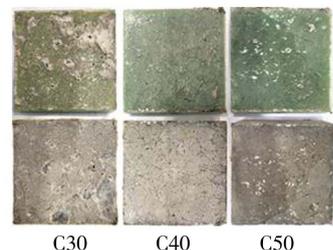
(a) 界面法向应力



(b) 粗糙度



(c) 胶层厚度



(d) 混凝土强度

图 3 不同影响因素条件下的界面破坏形态

严重。当粗糙度达到 1.23 时,界面的 FRP 板一侧均布满了剥离的混凝土。由图 3(c)可知,界面破坏位置均位于混凝土表层中,且胶层厚度越大,剥离的混凝土也越多。由图 3(d)可知,随着混凝土强度的增大,剥离的混凝土减少。

2.2 应力-位移关系

图 4 为 A 组试件试验全过程的应力-位移过程线。在加载初期,剪应力的增幅小于剪切位移的增幅,这表明随着剪切过程的进行,界面表现出刚度硬化的特性。在加载中后期,产生相同剪切位移的剪应力大幅度增大,曲线变陡。剪应力达到峰值后,继续加载导致剪应力快速下降。在试验的最后阶段,随着剪切位移的增大,剪应力逐渐稳定,抗剪强度由摩擦力提供。FRP-混凝土界面应力-位移关系总体呈现强烈的非线性变化特征,这与文献[14-15]的试验结果相同。剪应力与剪切位移的非线性是由于不同介质间黏结不充分导致的,在压剪条件下界面中存在的微小孔隙等缺陷使界面产生了相对较大的变形,随着剪切位移的增大,界面中的缺陷逐渐闭合,界面刚度也随之增大。

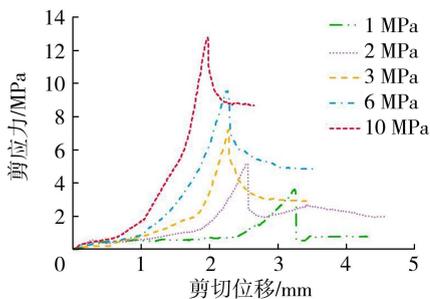


图 4 不同界面法向应力条件下的应力-位移关系曲线

图 4 还表明,界面剪应力达到峰值时的剪切位移和 FRP 筋与混凝土之间的黏结滑移试验的峰值位移^[16]在一个数量级,较大的峰值位移能有效协调充放气过程中 FRP 密封层与混凝土衬砌之间的变形,从而保证 FRP-混凝土衬砌密封结构能够保持良好的工作状态。

2.3 界面剪切强度

不同影响因素条件下的界面剪切强度如图 5 所示。由图 5(a)可知,随着界面法向应力的增大,界面的峰值剪切强度和残余剪切强度均逐渐升高,当界面法向应力从 1 MPa 提升至 10 MPa 时,界面峰值剪切强度从 3.49 MPa 提升至 13.8 MPa,界面残余剪切强度从 0.812 MPa 提升至 8.33 MPa,其峰值剪切强度和残余剪切强度与界面法向应力均具有线性正相关的关系,符合摩尔-库仑强度准则。

图 5(b)表明粗糙度对界面峰值剪切强度有重要影响,界面峰值剪切强度和残余剪切强度均随着

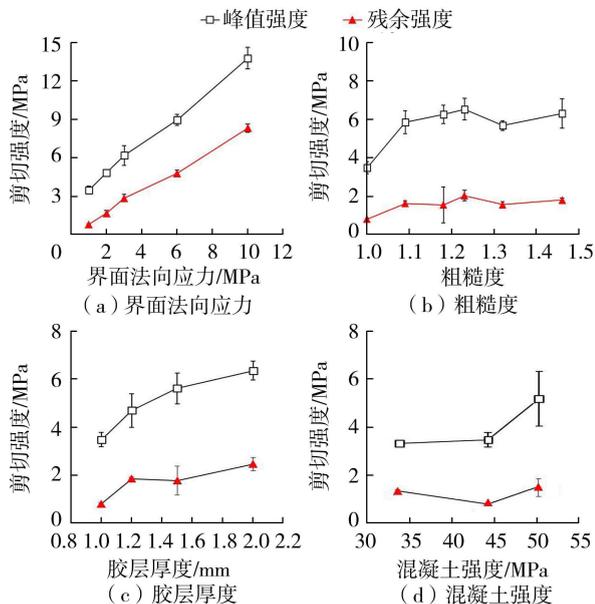


图 5 不同影响因素条件下的界面剪切强度变化规律

粗糙度的增大呈先增大后减小的趋势,当粗糙度达到 1.32 时,其对界面峰值剪切强度和残余剪切强度的提升最大,相较于粗糙度为 1.00 时界面峰值剪切强度提升了 87.44%,而界面残余剪切强度提升了 150.14%,可知粗糙度对界面峰值剪切强度的影响小于对残余剪切强度的影响。

界面胶层厚度对界面峰值剪切强度和残余剪切强度也有重要影响,由图 5(c)可知,界面峰值剪切强度和残余剪切强度与胶层厚度呈正相关关系,胶层越厚界面胶体与混凝土浆体的黏结力越强,界面破坏时的黏结能力也越强。当胶层厚度从 1.0 mm 增大至 2.0 mm 时,界面峰值剪切强度增大了 82.31%,界面残余剪切强度增大了 204.39%,可知胶层厚度对界面峰值剪切强度的影响小于对残余剪切强度的影响。

由图 5(d)可知,界面峰值剪切强度随着混凝土基材强度的增大而增大,而混凝土基材强度的变化对界面残余剪切强度的影响不大。当混凝土基材的强度从 33.45 MPa 提高至 50.24 MPa 时,界面峰值剪切强度提高了 55.89%,而界面残余剪切强度仅提高了 14.05%,可见混凝土基材强度对界面峰值剪切强度的影响大于对界面残余剪切强度的影响。

界面峰值剪切强度由界面的黏聚力和摩擦力组成,而界面残余剪切强度仅由界面的摩擦力组成,因此可通过分析不同影响因素对界面黏聚力和内摩擦角的影响来探究其对界面剪切强度的影响。①随着界面法向应力的增大,界面摩擦力迅速提高,这会明显提升界面峰值剪切强度和残余剪切强度。②粗糙度对界面剪切强度的影响较为复杂,粗糙度对界面剪切强度的影响主要通过界面摩擦力来表现:当混凝土界面由光滑开始变得粗糙时,凹槽提供了有效

机械摩擦,从而提高了界面的黏结性能,因此界面剪切强度快速增大;当粗糙度超过一定程度后,随着粗糙度的不断提高,凹槽的间距也越来越近,这使得界面破裂位置从混凝土内部粗骨料之间的浆体部分转移至混凝土表面凹槽之间的凸起浆体中,导致混凝土能够提供的抗剪强度减小,因此其破坏时所需的剪切应力也就变小。这与文献[6,17]的试验结果一致。③胶层厚度的增大会使得环氧树脂胶更容易浸入混凝土,这会改变界面的破坏面,增加界面破坏时的摩擦力,因此胶层厚度对界面峰值剪切强度的影响小于对残余剪切强度的影响。④混凝土基材强度越高,混凝土浆体能提供的抗剪能力也越强,因此界面胶体与混凝土浆体之间的黏结性能越好,界面破坏时的抗剪强度也越高,这主要是界面黏聚力增大造成的,这也是混凝土基材强度变化对残余剪切强度影响不大的原因。

2.4 界面刚度

图6给出了不同影响因素条件下界面剪切刚度和法向刚度试验结果,可以发现,界面剪切刚度和法向刚度随界面法向应力和胶层厚度的增大而增大。当界面法向应力从1 MPa提升至10 MPa时,界面剪切刚度提升了461.15%;当粗糙度从1.00提升至1.09时,界面剪切刚度快速升高,增大了109.31%,而随着粗糙度的持续增大,界面剪切刚度基本保持不变。胶层厚度的增大使得界面剪切刚度呈现线性增大的趋势,当胶层厚度从1.0 mm增大至2.0 mm时,界面剪切刚度提升了62.1%。而混凝土强度的提高对混凝土剪切刚度的影响不大。综上所述,界面法向应力对界面剪切刚度影响最大,粗糙度和胶层厚度次之,而混凝土强度基本没有影响。

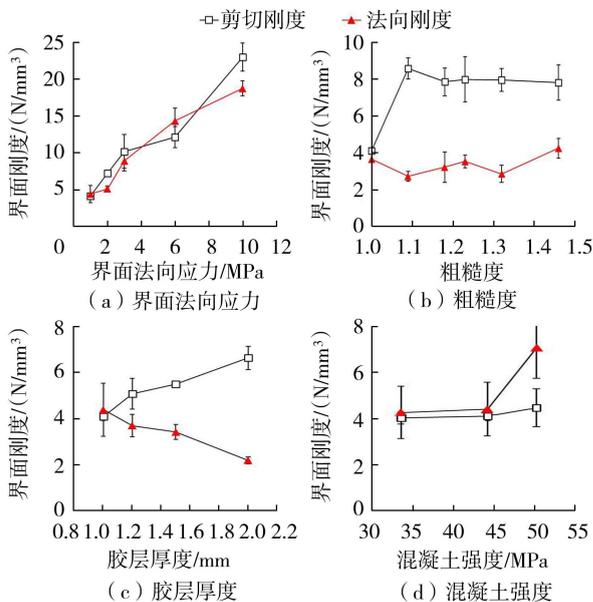


图6 不同影响因素条件下的界面刚度变化规律

界面法向刚度随界面法向应力和混凝土强度的增大而增大,随胶层厚度的增大而减小。当界面法向应力从1 MPa提升至10 MPa时,界面法向刚度提升了326.17%。胶层厚度的增大对界面法向刚度的影响呈现线性减小的趋势,当胶层厚度从1.0 mm增大至2.0 mm时,界面法向刚度衰退了50.37%。当混凝土基材的强度从33.45 MPa提高至50.24 MPa时,界面法向刚度提升了65.43%。粗糙度对界面法向刚度基本没有影响。可见,界面法向应力对界面法向刚度影响最大,胶层厚度和混凝土强度次之,而粗糙度基本没有影响。

2.5 界面断裂能

界面断裂能是FRP-混凝土界面在纯剪作用下界面破坏剥离时吸收的能量,是界面性能分析中的重要参数。在纯剪作用下,应力-位移曲线与横轴围成的面积即为界面断裂能;而在压剪条件下,计算界面断裂能需要去除法向应力的影响,具体计算公式可参考文献[18]。

图7为不同影响因素条件下的界面断裂能试验结果,可见界面断裂能随着界面法向应力、粗糙度和胶层厚度的增大而增大。当界面法向应力从1 MPa提升至10 MPa时,界面断裂能提升了159.55%;当粗糙度从1.00提升至1.09时,界面断裂能增大了256.13%,而随着粗糙度的持续增大,界面断裂能在6 N/mm附近浮动。胶层厚度的增大对界面断裂能的影响有限,当胶层厚度从1.0 mm增大至2.0 mm时,界面断裂能提升了54.95%。混凝土强度变化对界面断裂能的影响不明显,且数据较离散,这与文献[19]的研究结论一致。

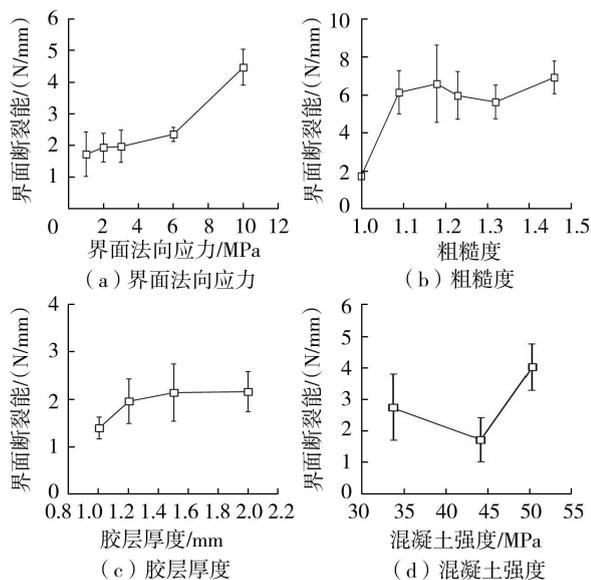


图7 不同影响因素条件下的界面断裂能变化规律

3 界面应力-位移关系

试验结果表明 FRP-混凝土界面应力-位移关系在峰值剪切强度前均表现出强烈的非线性变化特征,且呈现刚度硬化的特性,与文献[6-8]的试验结果存在明显差异,但与同为压剪条件下的不同介质界面应力-位移关系试验成果相似^[14-15]。这表明采用目前的研究成果分析 CAES 地下储气库密封结构的界面承载和破坏特性具有局限性。

借鉴文献[20]的双线性应力软化模型的三段式分段函数拟合 FRP-混凝土界面的应力-位移关系式,结果如图 8 所示,可见峰值剪切强度前的上升段分为 2 段,可采用 2 段线性函数来近似描述弹性阶段剪应力与剪切位移之间的非线性关系;而峰值剪切强度后的下降段可采用指数函数来描述其剪应力衰减过程。因此界面本构方程根据图 8 可表示为

$$\tau = \begin{cases} K_{s0}u & 0 \leq u < \alpha u_{smax} \\ K_s(u - \alpha u_{smax}) + \beta\tau_f & \alpha u_{smax} \leq u < u_{smax} \\ \tau_f & u_{smax} \leq u \end{cases} \quad (1)$$

式中: τ 、 τ_f 分别为界面剪应力和峰值剪切强度,MPa; u 、 u_{smax} 分别为界面剪切位移和峰值剪切强度对应的剪切位移,mm; K_{s0} 、 K_s 分别为初始剪切刚度和峰前剪切刚度, N/mm^3 ; α 、 β 为位移和应力的分段系数。根据峰值剪切强度和界面法向应力关系的试验成果(图 5(a)),峰值剪切强度 τ_f 满足摩尔-库仑强度准则,其表达式如下:

$$\tau_f = c + \sigma_n \tan \varphi \quad (2)$$

式中: σ_n 为界面法向应力,MPa; c 为界面黏聚力,MPa; φ 为界面内摩擦角,(°)。

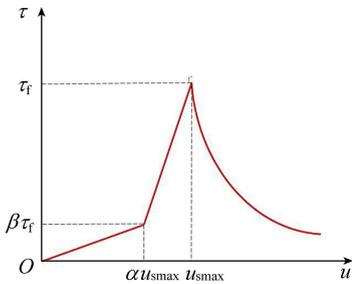


图 8 双线性应力软化模型

当剪应力达到峰值剪切强度后,界面逐渐破坏,黏聚力开始衰减,其衰减公式可用下式拟合:

$$c = c_0 \exp[-\lambda(u - u_{smax})] \quad (3)$$

式中: c_0 为界面初始黏聚力,MPa; λ 为界面黏聚力衰减形状系数。

根据图 4,可以求得式(1)中的 $\alpha = 0.727$, $\beta = 0.274$ 。图 9 给出了计算值与试验结果的对比,为证明本构模型的准确性和广泛适用性,图中试验值采

用了重复试验中的另一组不同界面法向应力作用下的试验结果。由图 9 可知,峰值剪切强度前采用双线性函数、峰值剪切强度后采用指数衰减函数构成的双线性应力软化模型可以较好地描述压剪条件下 FRP-混凝土界面的应力-位移关系。

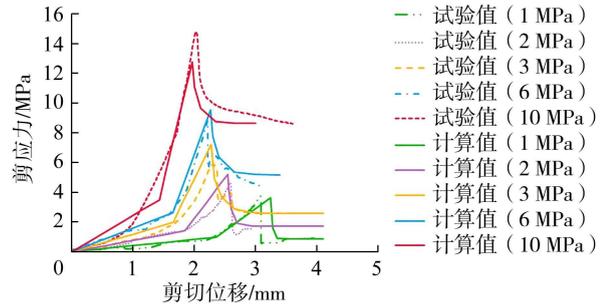


图 9 不同界面法向应力条件下试验与计算应力-位移曲线对比

4 结论

a. 当界面法向应力、粗糙度、胶层厚度和混凝土强度较大时,界面的破坏形态主要表现为混凝土界面砂浆剥离破坏。当界面法向应力、粗糙度、胶层厚度和混凝土强度较小时,界面的破坏形态主要表现为胶层与混凝土界面的分离。

b. 界面峰值剪切强度前的应力-位移关系呈现出显著的非线性变化特征;峰值剪切强度后,当界面法向应力较低时,界面表现为显著的脆性破坏特征,但随着界面法向应力的提高出现了明显的非线性软化特征。

c. 界面的剪切强度、刚度和断裂能都随着界面法向应力、粗糙度和胶层厚度的增大而增大;各影响因素对界面剪切强度和刚度的影响规律各不相同,而混凝土强度对界面断裂能没有明显的影响。

d. 采用摩尔-库仑强度准则可以很好地描述 FRP-混凝土界面在压剪条件下的屈服破坏行为。

参考文献:

- [1] 周瑜,夏才初,周舒威,等. 压气储能内衬洞室高分子密封层的气密与力学特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(12): 2685-2696. (ZHOU Yu, XIA Caichu, ZHOU Shuwei, et al. Air tightness and mechanical characteristics of polymeric seals in lined rock caverns (LRCs) for compressed air energy storage (CAES) [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(12): 2685-2696. (in Chinese))
- [2] 蒋中明,唐栋,李鹏,等. 压气储能地下储气库选型选址研究[J]. 南方能源建设, 2019, 6(3): 6-16. (JIANG Zhongming, TANG Dong, LI Peng, et al. Research on selection method for the types and sites of underground repository for compressed air storage [J]. Southern Energy

- Construction, 2019, 6(3) : 6-16 (in Chinese))
- [3] JIANG Zhongming, LI Peng, TANG Dong, et al. Experimental and numerical investigations of small-scale lined rock cavern at shallow depth for compressed air energy storage [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2020, 53 : 2671-2683.
- [4] KIM H M, LETTRY Y, RYU D M, et al. Mock-up experiments on permeability measurement of concrete and construction joints for air tightness assessment [J]. Materials and Structures, 2014, 47(1/2) : 127-140.
- [5] HE Wei, LUO Xing, EVANS D, et al. Exergy storage of compressed air in cavern and cavern volume estimation of the large-scale compressed air energy storage system [J]. Applied Energy, 2017, 208 : 745-757.
- [6] 殷雨时, 范颖芳, 徐义洪. 粗糙度对 CFRP-混凝土界面剪切黏结性能的影响 [J]. 建筑材料学报, 2018, 21 (2) : 202-207. (YIN Yushi, FAN Yingfang, XU Yihong. Roughness effects on the shear bonding properties of interface between CFRP and concrete [J]. Journal of Building Materials, 2018, 21(2) : 202-207. (in Chinese))
- [7] 郭诗惠, 张建仁, 高勇, 等. 胶层厚度对 CFRP 板材与混凝土界面黏结性能影响 [J]. 公路交通科技, 2015, 32 (9) : 87-91. (GUO Shihui, ZHANG Jianren, GAO Yong, et al. Effect of adhesive thickness on bond behavior of CFRP plate-concrete interface [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2015, 32 (9) : 87-91. (in Chinese))
- [8] 彭晖, 王博, 张建仁, 等. CFRP-混凝土界面黏结的疲劳性能试验研究 [J]. 实验力学, 2014, 29 (2) : 189-199. (PENG Hui, WANG Bo, ZHANG Jianren, et al. Experimental study of CFRP-concrete interfacial bonding fatigue behavior [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2014, 29(2) : 189-199. (in Chinese))
- [9] ALAM M S, KANAKUBO T, YASOJIMA A. Shear-peeling bond strength between continuous fiber sheet and concrete [J]. ACI Structural Journal, 2012, 109 (1) : 75-82.
- [10] ZHANG Wei. Experimental study on shear-peeling bond strength between a CFRP plate and concrete [J]. Magazine of Concrete Research, 2016, 68(11) : 568-580.
- [11] 黄俊豪, 钱永久, 杨华平, 等. 胶层厚度对 CFRP 布加固 RC 梁抗弯承载力影响研究 [J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 19(3) : 743-751. (HUANG Junhao, QIAN Yongjiu, YANG Huaping, et al. Influence of adhesive thickness on the flexural capacity of reinforced concrete beams strengthened with CFRP sheets [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2022, 19 (3) : 743-751. (in Chinese))
- [12] 任伟, 郭林, 杨旸, 等. 曲面混凝土构件内弧粘贴 FRP 弦剥离效应 [J]. 交通运输工程学报, 2019, 19(1) : 60-
70. (REN Wei, GUO Lin, YANG Yang, et al. String debonding effect of curved RC member reinforced by bonding FRP in intrados [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2019, 19 (1) : 60-70. (in Chinese))
- [13] 岳娟, 盛金昌, 王惠民, 等. 岩石-混凝土界面抗剪强度劣化研究进展 [J]. 水利水电科技进展, 2022, 42(5) : 15-21. (YUE Juan, SHENG Jinchang, WANG Huimin, et al. Research progress on shear strength deterioration of rock-concrete interface [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(5) : 15-21. (in Chinese))
- [14] 刘江豪, 郭保华, 程坦, 等. 岩石-混凝土界面峰值剪切强度经验公式试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(10) : 2552-2565. (LIU Jianghao, GUO Baohua, CHENG Tan, et al. Experimental study on empirical formula of peak shear strength for rock-concrete interface [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(10) : 2552-2565. (in Chinese))
- [15] 谢和平, 陈忠辉, 易成, 等. 基于工程体-地质体相互作用的接触面变形破坏研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(9) : 1767-1780. (XIE Heping, CHEN Zhonghui, YI Cheng, et al. Research on deformation and failure of interface based on interaction between structural body and geo-body [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(9) : 1767-1780. (in Chinese))
- [16] 郝庆多, 王言磊, 侯吉林, 等. CFRP 带肋筋黏结性能试验研究 [J]. 工程力学, 2008, 25 (10) : 158-165. (HAO Qingduo, WANG Yanlei, HOU Jilin, et al. Experimental study on bond behavior of GFRP ribbed rebars [J]. Engineering Mechanics, 2008, 25 (10) : 158-165. (in Chinese))
- [17] 张雷, 黄飞亚, 张英豪, 等. 水性环氧砂浆与混凝土界面剪切性能试验研究 [J]. 水利水电科技进展, 2023, 43 (2) : 39-43. (ZHANG Lei, HUANG Feiya, ZHANG Yinghao, et al. Experimental study on shear performance of waterborne epoxy mortar and concrete interface [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43(2) : 39-43. (in Chinese))
- [18] CAGGIANO A, ETSE G. Coupled thermo-mechanical interface model for concrete failure analysis under high temperature [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2015, 289 : 498-516.
- [19] NETO P, ALFAIATE J, DIAS-DA-COSTA D, et al. Mixed-mode fracture and load misalignment on the assessment of FRP-concrete bond connections [J]. Composite Structures, 2016, 135 : 49-60.
- [20] WOO S K, LEE Y. Experimental study on interfacial behavior of CFRP-bonded concrete [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2010, 14(3) : 385-393.

(收稿日期: 2024 - 03 - 23 编辑: 熊水斌)