

文章编号:1673-9469(2025)03-0001-05

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2025.03.001

# 超低能耗建筑密封胶抗剪力学性能试验和计算模型研究

杨士莹<sup>1</sup>, 王天龙<sup>2\*</sup>, 王晓磊<sup>3</sup>

(1. 住建部科技与产业化发展中心北京康居认证中心, 北京 100835; 2. 中建城市建设发展有限公司, 北京 100037;  
3. 河北工程大学 土木工程学院, 河北 邯郸 056038)

**摘要:** 为了研究超低能耗建筑密封胶的抗剪力学性能, 通过万能试验机对密封胶层施加单调加载, 分析胶层厚度、胶层宽度和密封胶弹性模量对密封胶剪切性能的影响规律, 并建立胶层处剪切应力计算模型。结果表明, 试件的破坏类型主要分为胶接界面破坏和胶层剪切破坏。在相同应变条件下, 密封胶的剪切应力与胶层厚度呈负相关, 而与胶层宽度呈正相关。提出了适用于以剪切为主、正应力可忽略的超低能耗建筑缝间密封胶的内力计算模型, 计算值与试验值结果基本吻合。

**关键词:** 超低能耗建筑; 密封胶; 力学性能; 计算模型

中图分类号: TU57

文献标识码: A

## Study on Shear Mechanical Properties and Calculation Model of Sealing Adhesives for Ultra-low Energy Consumption Buildings

YANG Shixuan<sup>1</sup>, WANG Tianlong<sup>2\*</sup>, WANG Xiaolei<sup>3</sup>

(1. CSTID Beijing Kangju Certification Center, Beijing 100835, China; 2. CSCEC City Construction Development Co., Ltd., Beijing 100037, China; 3. School of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Handan, Hebei 056038, China)

**Abstract:** In order to study the shear mechanical properties of ultra-low energy building sealants, a monotonic loading test was conducted using a single-axis testing machine on the sealant layer. The influence laws of the thickness, width of the sealant layer and the elastic modulus of the sealant on the shear performance of the sealant were analyzed, and a shear stress calculation model at the sealant layer was established. The results showed that the failure types of the specimens mainly included the failure of the bonding interface and the shear failure of the sealant layer. Under the same strain conditions, the shear stress of the sealant was negatively correlated with the thickness of the sealant layer and positively correlated with the width of the sealant layer. An internal force calculation model applicable to the sealing glue between joints of ultra-low energy buildings, which is mainly shear-driven and the normal stress can be ignored, was proposed. The calculated values were basically consistent with the experimental values.

**Key words:** ultra-low energy consumption building; sealant; mechanical properties; calculation model

随着全球能源危机的日益严峻和环境保护意识的不断提高, 超低能耗建筑作为节能减排的重要途径, 正逐渐成为建筑行业发展的主要趋势<sup>[1]</sup>。良好的建筑气密性是实现近零能耗建筑目标的重

要条件之一<sup>[2]</sup>。在超低能耗建筑的设计与施工中, 早期使用树脂和砂浆的混合物填充密封间隙, 以保护建筑内部构件免受湿气和水侵入腐蚀。自1950年以来, 随着化学工业的发展, 聚合物合成密

收稿日期: 2024-02-14

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2022YFE0134100); 中建六局科技研发计划资助项目(CSCEC6B-2024-Z-4)

第一作者: 杨士莹(1993—), 女, 河北保定人, 博士, 工程师, 研究方向: 高品质建筑设计。

\* 通信作者: 王天龙(1993—), 男, 河北邯郸人, 博士, 工程师, 研究方向: 高品质建筑设计及智能建造。

封材料逐渐取代树脂和砂浆,其中硅基聚合物因其出色的防水密封性,常作为超低能耗建筑粘结材料,其剪切性能直接关系到建筑物的气密性、防水性能和保温隔热效率<sup>[3-4]</sup>。特别是在超低能耗建筑的不同材料交接处,密封胶凭借其剪切性能,不仅能阻止冷热空气的渗透,提高建筑的保温隔热性能,而且能降低建筑能耗。然而,密封胶在实际应用中面临着复杂的力学环境和气候条件。调查发现,仅在房地产市场,密封胶剪切破坏失效导致外界潮湿入侵超低能耗建筑内部,所产生的维修成本约700亿美元<sup>[5]</sup>。密封胶在大剪切应变下变形损坏所导致的后果,让建筑行业意识到了密封胶抗剪切的重要性。

迄今为止,众多学者开展了应用于超低能耗工程中密封胶的剪切试验,探究了基材种类和应变率等参数对胶粘剂粘接性能的影响,发现基材对胶缝极限剪切承载能力和剪切变形能力影响较大<sup>[6-7]</sup>。最早,Lacasse等<sup>[8]</sup>通过制作尺寸为2.5 mm×2.5 mm×10 mm的微小试件,评估密封胶的循环疲劳力学性能,将试验结果与ASTM D1243规范中建议的标准模型(12.7 mm×12.7 mm×50.8 mm)所得结果进行对比分析发现,当胶条宽深长比相同时,较小试件的疲劳现象与标准试件的疲劳现象相似。Nemati等<sup>[9]</sup>通过密封胶剪切试验,发现不同种类密封胶会改变木材-混凝土接缝处的抗剪强度。韦明方等<sup>[10]</sup>探讨了硅烷改性聚氨酯、催化剂、硅烷偶联剂及耐候助剂含量对中空玻璃幕墙中密封胶性能的影响,发现邻羟基苯甲酸苯酯可显著增加胶层的耐候性能。徐恭圣等<sup>[11]</sup>采用三维离散元法模拟钢桥面铺装层间剪切行为,发现胶层剪切应力集中于边缘区域。Yang等<sup>[12]</sup>通过对密封胶双剪试件进行循环剪切试验,发现剪

切应变相同时,胶层厚度的增加提高了胶缝的累积能量消耗。

目前关于超低能耗建筑中密封胶几何尺寸对接缝失效的研究仍显不足,通过开展不同尺寸的密封胶剪切试验研究单调载荷作用下密封胶的抗剪力学性能,从而得到胶层处的剪切应力计算模型,将计算值与试验值比较,验证了模型的可行性和准确性。本文研究为超低能耗建筑的设计与施工提供科学依据,还可以为密封胶的选材、优化设计和质量控制提供理论支持。

## 1 剪切试验概况

### 1.1 试件设计

为研究密封胶性能,选用性能稳定的石材为基材,表面选取机切面,根据《非结构承载用石材密封胶》(JC/T 989—2016),选用“凸”型试件形式,制作试块的石块宽度×长度×厚度为75 mm×75 mm×25 mm。3个石材试块通过密封胶进行粘结,两侧粘结面积相同,试件示意图如图1所示。采用具有25级商用位移能力的2种密封胶,厂家按《石材用建筑密封胶》(GB/T 23261—2009)和《硅酮和改性硅酮建筑密封胶》(GB/T 14683—2017)进行弹性模量试验,得到两种胶在23℃养护28 d时弹性模量分别为0.500 MPa(试件编号为J1)和1.041 MPa(试件编号为J2)。粘结3个石材试块时,设计了胶层长度×胶层厚度为45 mm×5 mm、45 mm×7 mm和45 mm×9 mm 3种密封胶的截面尺寸。试件具体参数见表1。在超低能耗建筑中,如果胶缝尺寸或宽厚比超出适宜范围,会显著增加密封胶固化时长。为进一步分析胶层宽度对密封胶剪切性能的影响,将密封胶层宽度设为75 mm和10 mm。

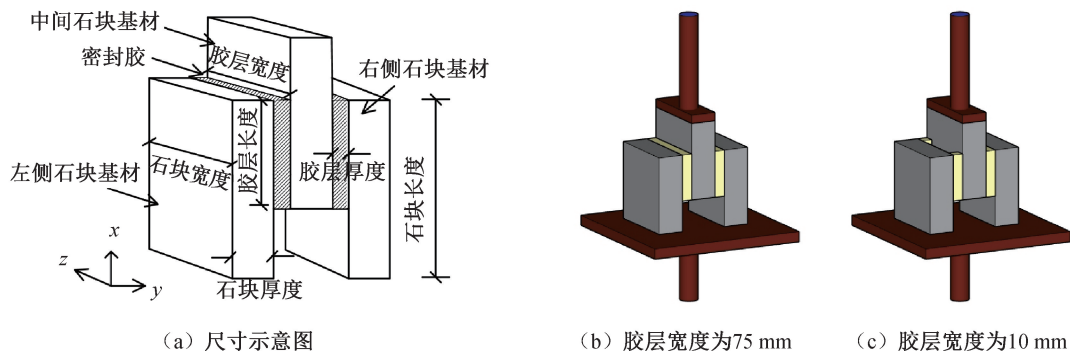


图1 剪切试件示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the shear specimen

表 1 剪切试件参数

Tab.1 Cut the specimen parameters

试件名称	弹性模量/MPa	胶层厚度/mm	单侧胶层数量/个	胶层宽度/mm	密封胶与石块的粘结面积/mm <sup>2</sup>
J1-10-5	0.500	5	2	10	1 800
J1-10-7	0.500	7	2	10	1 800
J1-10-9	0.500	9	2	10	1 800
J1-75-7	0.500	7	1	75	6 750
J1-75-9	0.500	9	1	75	6 750
J2-10-5	1.041	5	2	10	1 800
J2-10-7	1.041	7	2	10	1 800
J2-10-9	1.041	9	2	10	1 800
J2-75-5	1.041	5	1	75	6 750
J2-75-7	1.041	7	1	75	6 750
J2-75-9	1.041	9	1	75	6 750

1.2 试验仪器与加载

试验在 5 T 万能试验机上进行,采用 5 mm/min 位移控制加载至破坏。加载前确保试件轴线与设备中心线对齐,全程记录破坏荷载、位移量、破坏形态及试验现象。为减少试验过程产生的随机误差,每种试件制作 4 个,试验数据取各加载级试验结果的平均值。

2 试验结果与分析

2.1 试验现象

试验采用的两种不同弹性模量密封胶的试验现象较为相似且胶层厚度对试验现象影响较小。随着密封胶宽度的增加,试件中密封胶的破坏情况逐渐从胶接界面破坏转变为胶层剪切破坏。试件的典型破坏现象如图 2 所示。从图 2(a)中可见,试件 J1-10-7 在加载过程中出现胶接界面破坏,开裂位置均发生在端部,原因是端部效应造成界面起裂位置在胶接的末端,随着荷载增加,试件胶接界面完全分离。从图 2(b)中可见,试件 J1-75-7 在加载过程中发生胶层剪切破坏,原因是密封胶内聚破坏,其自身失效,反映了胶层宽度减小后密封胶抵抗劈裂或断裂的能力不足。当剪切位

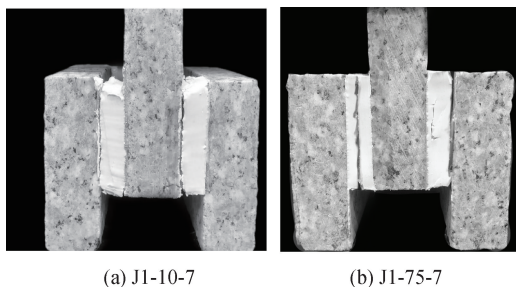


图 2 剪切破坏现象

Fig.2 Shear failure phenomenon

移大于胶层厚度时,其胶层端部开始出现微小裂纹,随着荷载增加,裂纹尺寸逐渐扩大且数量增多,直至这些裂纹相互连接并形成贯穿性的破坏,最终导致试件失效。

2.2 试件剪切模量

在实际情况下,基材的变形将引起胶层剪切变形,如图 3(a)所示,胶接界面剪切应力呈现非均匀分布特征,尤其在胶接区末端因应变集中效应显著,导致局部应力峰值的产生。为简化分析,密封胶胶接面单位面积上的平均剪切应力  $\bar{\tau}$  可用式(1)表示,简化变形模型如图 3(b)所示。

$$\bar{\tau} = F/S = \frac{F}{2lnD} \tag{1}$$

式中: $F$  是试验机对试件施加的荷载,kN; $S$  是密封胶与石块的粘结面积,mm<sup>2</sup>; $D$  是胶层宽度,mm; $2l$  是胶层长度,mm; $n$  是单侧胶层数量,个。

密封胶平均剪切应变  $\bar{\gamma}$  为

$$\bar{\gamma} = \Delta u/c \tag{2}$$

式中: $\Delta u$  是在力  $F$  的作用下胶的剪切变形量,mm; $c$  是胶层厚度,mm。

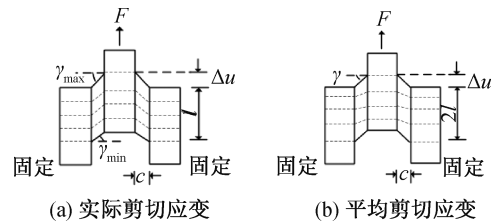


图 3 弹性粘接体加载后的变形图

Fig.3 Deformation of elastic adhesive body after loading

密封胶的剪切模量  $G$  可按式(3)进行计算:

$$G = \frac{\bar{\tau}}{\bar{\gamma}} = \frac{Fc}{2\Delta unlD} \tag{3}$$

密封胶由多种材料复合构成,属于非线性材料范畴。鉴于其模量并非固定值,行业内通常采用模量与应变这两个参数共同描述其性能。根据《硫化橡胶或热塑性橡胶与刚性板剪切模量和粘合强度的测定四板剪切法》(GB/T 12830—2008) 11.1 规定,对应变为 25%时的剪切模量进行分析,计算结果汇总于表 2。整理得到两种胶在应变为 25%时剪切模量为 0.395 MPa 和 0.425 MPa。剪切强度按破坏荷载除以粘结面积而得,根据试验结果分析得知,密封胶胶层厚度越小,其剪切强度越大。这是因为当采用相同密封胶时,胶层越厚,胶接处应力集中系数越小,胶层内部的缺陷呈指数关系迅速增加。此外,胶层越厚,因密封胶固化收缩而产生的收缩应力也越大,从而强度降低。在相同应变条件下,密封胶的剪切应力随胶层厚度增加呈下降趋势。试验数据显示,当胶层厚度由 5 mm 增至 9 mm 时,应变为 25%时的剪切应力降低 7%;而胶层宽度减小则会反向引起剪切应力增大。整理得到两种密封胶在 25%应变条件下的剪切模量分别为 0.395 MPa 和 0.425 MPa。剪切强度通

过破坏荷载与有效粘结面积的比值计算获得,可见密封胶剪切强度与胶层宽度呈现显著负相关关系,当宽度由 5 mm 增至 9 mm 时,剪切强度从 0.672 MPa 降至 0.624 MPa,降幅为 7.1%。进一步分析发现,宽度每增加 2 mm,剪切强度平均下降约 2.4%。

### 3 胶接界面剪切应力计算模型

为构建一个密封胶剪切应力计算模型,基于以下假定来推导:(1)不计载荷偏心所导致的弯矩效应;(2)胶层正应力极小,忽略不计;(3)胶层所承受的剪切应力和两侧基材之间的相对位移保持线性关系。根据试验观察结果,单调剪切时试件力学模型如图 4 所示,密封胶与石块基材之间受剪切应力,石块基材受外荷载作用下的线荷载。

石块所受线荷载  $T$  为

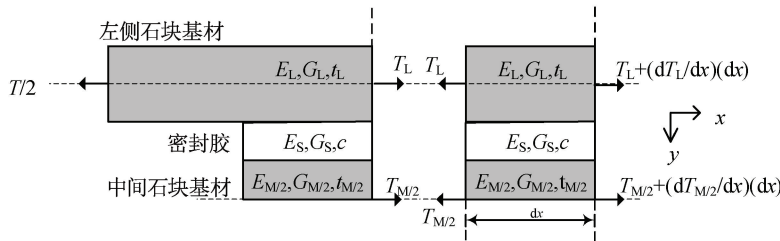
$$T = \frac{F}{W} \tag{4}$$

式中: $W$  是石块宽度,mm。胶层宽度与石块基材相等时,由微元体的平衡条件可得式(5)。

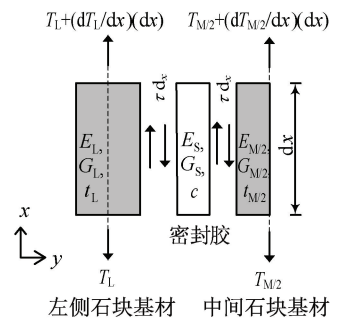
表 2 剪切试件试验值

Tab. 2 Test value of shear specimens

试件名称	剪切强度/MPa	应变为 25%时的剪切应力/MPa	剪切模量/MPa	平均剪切模量/MPa
J1-10-5	0.672	0.112	0.448	0.395
J1-10-7	0.650	0.108	0.433	
J1-10-9	0.624	0.104	0.416	
J1-75-7	0.578	0.096	0.385	
J1-75-9	0.447	0.075	0.298	
J2-10-5	0.635	0.106	0.423	0.425
J2-10-7	0.614	0.102	0.409	
J2-10-9	0.531	0.089	0.354	
J2-75-5	0.785	0.131	0.523	
J2-75-7	0.722	0.120	0.481	
J2-75-9	0.542	0.090	0.361	



(a) 局部模型



(b) 微元模型

注:图中  $T$  是石块所受线荷载, $d$  为微分符号,下标 L、S、M/2 表示左侧石块基材、密封胶和一半的中间石块基材。

图 4 单调剪切时试件力学模型

Fig. 4 Test piece mechanical model during monotonic shear

$$\begin{cases} \frac{dT_L}{dx} + \tau = 0 \\ \frac{dT_{M/2}}{dx} - \tau = 0 \end{cases} \quad (5)$$

胶层的剪切应力-应变关系为

$$\begin{cases} \frac{du_L}{dx} = \varepsilon_L = \frac{T_L}{E_L t_L} \\ \frac{du_{M/2}}{dx} = \varepsilon_{M/2} = \frac{T_{M/2}}{E_{M/2} t_{M/2}} = \frac{T/2 - T_L}{E_{M/2} t_{M/2}} \\ \tau = G\gamma = \frac{\Delta u G}{c} \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $E$  为弹性模量, MPa;  $t$  为石材基材厚度, mm。

由此解得左侧石块所受线荷载  $T_L$  和密封胶胶层单位面积上的剪切应力  $\tau$ , 为简化公式表达引入系数  $\lambda$  表示:

$$\begin{cases} T_L = \frac{T}{2} \left[ -\frac{1}{2} \frac{\sinh(\lambda x)}{\sinh(\lambda l)} - \frac{1}{6} \frac{\cosh(\lambda x)}{\cosh(\lambda l)} + \frac{2}{3} \right] \\ \tau = \frac{T\lambda}{4} \left[ \frac{\cosh(\lambda x)}{\cosh(\lambda l)} + \frac{1}{3} \frac{\sinh(\lambda x)}{\sinh(\lambda l)} \right] \\ \lambda = \sqrt{\frac{G}{c} \left( \frac{1}{E_L t_L} + \frac{1}{E_{M/2} t_{M/2}} \right)} \end{cases} \quad (7)$$

当胶层宽度与石块基材宽度不等时, 引入宽度比系数  $\xi$ , 可得胶层界面剪切应力计算值  $\tau_\xi$  为

$$\xi = \frac{W}{nD} \quad (8)$$

$$\tau_\xi = \xi\tau \quad (9)$$

当中间石块基材受到外荷载为 1 kN 时, 密封胶处于弹性阶段, 胶层厚度与剪切应力的变化规律如图 5 所示, 其中  $\tau_{\max}$  为胶缝上的最大位置处的

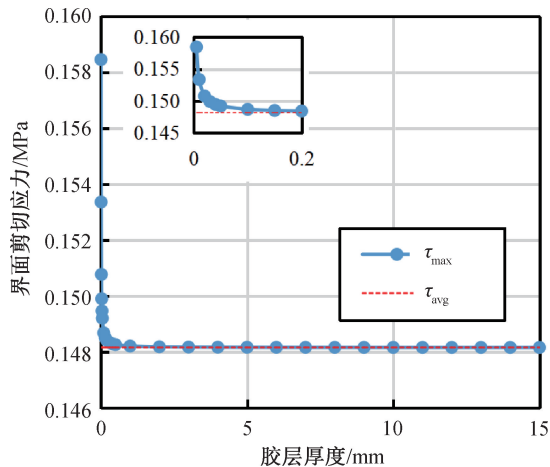


图 5 J1-75-9 胶层厚度与界面剪切应力的关系 ( $F=1$  kN)

Fig. 5 Relationship between sealant thickness and shear stress J1-75-9 ( $F=1$  kN)

应力计算值,  $\tau_{\text{avg}}$  为试验结果, 计算值与试验值结果基本吻合。在相同外荷载作用下, 胶层厚度增加会导致最大剪切应力减小, 其中当厚度超过 0.1 mm 后, 界面剪切应力小幅下降并趋于稳定。

## 4 结论

1) 不同弹性模量的密封胶均展现出良好的变形能力和相似的破坏现象。随着胶层宽度的提高, 试件中密封胶的破坏情况逐渐从胶接界面破坏转变为胶层剪切破坏。

2) 在相同应变条件下, 增加胶层厚度会降低密封胶的剪切应力, 而减小胶层宽度会增大其剪切应力。

3) 提出了适用于以剪切为主、正应力可忽略的超低能耗建筑缝间密封胶的内力计算模型, 为今后超低能耗建筑密封胶工程应用提供了理论基础。

## 参考文献:

[1] WANG T L, ZHANG X A, YANG S X, et al. Quantifying the influence of modeling uncertainties on performance evaluation of mega column-core tube-outrigger structure under near-field and far-field ground motions [J]. *Journal of Building Engineering*, 2022, 59: 105052.

[2] 董小丽, 成雄蕾, 付铮. 基于多目标的寒冷地区近零能耗建筑优化设计方法与应用[J]. *建筑科学*, 2024, 40(12): 205-212.

[3] WANG T L, ZHANG X A, YANG S X, et al. Analysis of construction parameters of outriggers in the mega column-core tube-outrigger structure based on seismic reliability [J]. *Structures*, 2022, 40: 786-802.

[4] WANG T L, ZHANG X A, LI K, et al. Mechanical performance analysis of a piezoelectric ceramic friction damper and research of its semi-active control strategy [J]. *Structures*, 2021, 33: 1510-1531.

[5] YANG S X, GUO Z X, YE Y. Experimental investigation on mechanical performance of kerf anchorage of stone cladding considering construction defects [J]. *Journal of Building Engineering*, 2024, 83: 108436.

[6] WANG T L, ZHANG X A, YANG S X. A multiresolution adaptive grid method for solving the generalized probability density equation in stochastic dynamic analysis [J]. *Acta Mechanica*, 2022, 233(5): 1911-1940.

(下转第 14 页)

式为混凝土、钢筋和钢管缺陷一侧受弯,钢管脱空侧中部鼓曲,混凝土脱空侧裂缝扩大而破坏。

#### 参考文献:

- [1] 韩林海. 钢管混凝土结构-理论与实践[M]. 3版. 北京: 科学出版社, 2016.
- [2] 张栋培, 冷飞, 吴二军, 等. 温度梯度作用下钢管混凝土拱桥拱脚混凝土裂缝控制研究[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2022, 39(2): 64-70+79.
- [3] 廖飞宇, 李艳飞, 尧国皇, 等. 带球冠形脱空缺陷的钢管混凝土试件拉弯试验和承载力计算方法研究[J]. 建筑结构学报, 2021, 42(5): 165-176.
- [4] LIAO F Y, HAN L H, HE S H. Behavior of CFST short column and beam with initial concrete imperfection: Experiments[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2011, 67(12): 1922-1935.
- [5] LIAO F Y, HAN L H, TAO Z. Behaviour of CFST stub columns with initial concrete imperfection: Analysis and calculations [J]. Thin-Walled Structures, 2013, 70: 57-69.
- [6] HAN L H, YE Y, LIAO F Y. Effects of core concrete initial imperfection on performance of eccentrically loaded CFST columns [J]. Journal of Structural Engineering, 2016, 142(12): 04016132.
- [7] HAN L H, HOU C, HUA Y X. Concrete-filled steel tubes subjected to axial compression: Life-cycle based performance [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2020, 170: 106063.
- [8] 叶勇, 韩林海, 陶忠. 脱空对圆钢管混凝土受剪性能的影响分析[J]. 工程力学, 2016, 33(S1): 62-66+71.

- [9] YE Y, LI W, LIU X J. Behaviour of concrete-filled steel tubes with concrete imperfection under axial tension [J]. Magazine of Concrete Research, 2021, 73(14): 743-756.
- [10] 刘威. 钢管混凝土局部受压时的工作机理研究[D]. 福州: 福州大学, 2005.
- [11] ATTARD M M, SETUNGE S. Stress-strain relationship of confined and unconfined concrete [J]. Materials Journal, 1996, 93(5): 432-442.
- [12] 沈聚敏. 钢筋混凝土有限元板壳极限分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 1993.
- [13] HAN L H, YAO G H, TAO Z. Performance of concrete-filled thin-walled steel tubes under pure torsion [J]. Thin-Walled Structures, 2007, 45(1): 24-36.
- [14] 赵大洲. 钢管-钢管高强混凝土组合柱力学性能的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2003.
- [15] 赖柄霖, 温安平, 舒赣平, 等. 超高强型钢混凝土组合柱受力性能及设计方法[J]. 建筑结构学报, 2023, 44(8): 139-148.
- [16] 王静峰, 刘伟, 沈奇罕, 等. 考虑环向脱空影响的椭圆钢管混凝土短柱轴压性能研究[J]. 建筑结构学报, 2023, 44(2): 50-63.
- [17] 刘子丹, 焦文帅, 程展, 等. 钢管不锈钢管超高性能混凝土柱轴压性能研究[J]. 工业建筑, 2023, 53(5): 17-27.
- [18] 沈金生, 彭宁宁, 安新正, 等. 钢管再生混凝土短柱承载性能有限元分析[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2021, 38(4): 1-6+74.

(责任编辑 周雪梅)

(上接第5页)

- [7] WALLAU W, RECKNAGEL C. Durability assessment of structural sealant glazing systems applying a performance test method [J]. The Journal of Adhesion, 2022, 98: 464-487.
- [8] LACASSE M A, GIFFIN G B, MARGESON J C. Laboratory cyclic fatigue test of silicone sealant mini-specimens [J]. Astm Special Technical Publication, 1999, 1334: 51-65.
- [9] NEMATI G, FU Q, YAN L, et al. The effect of adhesive amount and type on failure mode and shear strength of glued timber-concrete joints [J]. Construction and Building Materials, 2022, 345: 128375.

- [10] 韦明方, 陈星任, 张志军, 等. 双组分硅烷改性聚氨酯中空玻璃密封胶的制备及性能研究[J]. 中国建筑防水, 2024, 42(10): 40-43+47.
- [11] 徐恭圣, 刘云, 于昌权. 基于三维离散元法的钢桥面铺装层间剪切模拟[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2018, 35(1): 71-75.
- [12] YANG S X, GUO Z X, YE Y, et al. Experimental and numerical study on the shear performance of the stone panel-panel joint in stone cladding [J]. Buildings, 2023, 13(12): 3079.

(责任编辑 周雪梅)