

波形钢板-橡胶界面黏结滑移性能

王威 柳国良 李昱 周强 陈杰

Bond-slip properties of corrugated steel plate-rubber interface

WANG Wei, LIU Guoliang, LI Yu, ZHOU Qiang, CHEN Jie

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20240824.004>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

锈蚀对钢板表面特性及CFRP板-锈蚀钢板界面黏结性能的影响

Effect of corrosion on the surface properties of steel plate and interfacial bonding properties between CFRP plate and corroded steel plate

复合材料学报. 2022, 39(2): 746–758 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210422.001>

大直径玻璃纤维增强聚合物复合材料抗浮锚杆外锚固性能试验及黏结-滑移模型

External anchorage performance test and bond-slip model of large diameter glass fiber reinforced polymer composite anti-floating anchor

复合材料学报. 2020, 37(4): 896–906 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190618.002>

固化剂混掺对高温下CFRP板-钢板界面黏结性能的影响

Effect of curing agent mixing on interfacial bond behavior of glued CFRP plate-steel plate at elevated temperature

复合材料学报. 2021, 38(12): 4073–4089 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210311.005>

重组竹-混凝土界面粘结-滑移本构模型

Bond-slip constitutive model of bamboo scrimber-concrete interface

复合材料学报. 2022, 39(5): 2299–2307 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210804.002>

波纹钢板-混凝土界面能耗及其本构关系

Energy consumption and constitutive relationship of interface between corrugated steel plate and concrete

复合材料学报. 2024, 41(3): 1588–1600 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20230919.001>

盐碱和冻融环境下GFRP筋/ECC材料粘结滑移模型

Bond-slip model of GFRP bars/ECC interface in alkaline-saline or freeze-thaw environments

复合材料学报. 2023, 40(5): 2859–2875 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20220706.001>



扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

波形钢板-橡胶界面黏结滑移性能



分享本文

王威*, 柳国良, 李昱, 周强, 陈杰

(西安建筑科技大学 土木工程学院, 西安 710055)

摘要: 波形钢板-橡胶构件因波形钢板的几何形状优势, 表现出良好的抗震性能, 对其界面黏结滑移性能有待研究。考虑波形钢板与橡胶界面的黏结长度、粗糙度和试件的加载方式对两者界面性能的影响, 设计了 6 个波形钢板-橡胶试件进行往复加载试验, 根据黏结破坏过程、界面耗能、应变分布和影响因素分析试件的黏结性能。结果表明: 波形钢板-橡胶界面受往复荷载作用时, 黏结破坏依次经历微滑移、滑移、破坏、曲线下降和残余阶段; 从能量角度分析发现: 黏结长度的长短显著影响界面耗能; 合理控制粗糙度, 可改善试件界面耗能, 提高界面黏结性能; 波形钢板-橡胶构件在荷载较大时, 应变发生突变且波脊处影响最大; 与单调加载相比, 往复加载下试件的残余黏结滑移降低 29%; 波形钢板-橡胶试件的极限特征黏结强度随黏结长度和粗糙度的增大呈现出先增加后逐步减弱; 最后确定了波形钢板与橡胶构件的特征黏结强度计算公式, 并进行了计算值与试验值的比较, 其吻合度较好。

关键词: 波形钢板-橡胶; 往复加载试验; 黏结滑移性能; 应变分布分析; 特征黏结强度计算公式

中图分类号: TU398.9; TB333

文献标志码: A

文章编号: 1000-3851(2025)04-2235-13

Bond-slip properties of corrugated steel plate-rubber interface

WANG Wei*, LIU Guoliang, LI Yu, ZHOU Qiang, CHEN Jie

(School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: Due to the geometric advantages of corrugated steel plates, corrugated steel plates-rubber members exhibit good seismic performance. The bond-slip property of their interface requires investigation. To study the interface properties of corrugated steel plate and rubber, 6 specimens were designed for reciprocal loading tests, considering bonding length, roughness, and loading mode effects. Analysis of the specimens' bonding properties involve examining bonding failure processes, interfacial energy dissipation, strain distribution and influencing factors. Results indicate that under reciprocal loads, bonding failure progresses through microslip, slip, failure, curve decline and residual stages. Energy analysis reveals that the bond length's magnitude significantly affects the interfacial energy dissipation. Reasonable control of roughness can improve the specimen interfacial energy dissipation and improve the interfacial bonding performance. High loads on corrugated steel plates and rubber members cause abrupt strain changes, with the wave ridge experiencing the most significant impact. Residual bond slip under reciprocal loading is 29% lower than under monotone loading. The ultimate characteristic bond strength of the corrugated steel plate-rubber specimens shows an increase and then a gradual decrease with the increase of bond length and roughness; Formulas for calculating characteristic bond strength for these members are established, with calculated values compared to experimental results showing a good coincidence.

Keywords: corrugated steel plate-rubber; reciprocal loading test; bond-slip property; strain distribution analysis; characteristic bond strength formulas

收稿日期: 2024-05-16; 修回日期: 2024-07-23; 录用日期: 2024-08-02; 网络首发时间: 2024-08-26 13:17:00

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20240824.004>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52278214; 52378314); 陕西省自然科学基金基础研究计划重点项目 (2022JZ-21); 土木工程防灾减灾全国重点实验室开放基金 (SLDRCE23-06)

National Natural Science Foundation of China (52278214; 52378314); Key Project of Nature Science Foundation Program of Shaanxi Province (2022JZ-21); Open Subject Fund of State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering (SLDRCE23-06)

通信作者: 王威, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为组合结构与混合结构 E-mail: wangwgh1972@163.com

引用格式: 王威, 柳国良, 李昱, 等. 波形钢板-橡胶界面黏结滑移性能 [J]. 复合材料学报, 2025, 42(4): 2235-2247.

WANG Wei, LIU Guoliang, LI Yu, et al. Bond-slip properties of corrugated steel plate-rubber interface[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2025, 42(4): 2235-2247(in Chinese).

钢-橡胶构件是将钢与橡胶通过胶黏剂有效黏结而形成的组合构件。由于橡胶的高弹性、可压缩性、高阻尼等特性，钢-橡胶构件在小变形下就能发挥耗能作用，具有优异的抗震和减振性能^[1-3]。近年来，波形钢板凭借其独特的几何特性，被广泛应用于土木工程领域^[4-6]。由于波形钢板面外刚度大，将其应用在剪力墙结构中^[4-5]，不仅可提高构件的承载力，还可节省钢材用量；将其应用在阻尼器结构中^[6]，极大改善了阻尼器的延性和耗能能力。波形钢板因其独特的截面形状与橡胶结合，形成波形钢板-橡胶构件，有效增加了黏结面积和橡胶填充量，波形钢板对称布置使得界面处应力分布更加均匀^[7]，形成更好的组合机制，将极大增强建筑结构的抗震性能。

目前，针对钢-橡胶构件的研究大多集中在力学性能的研究，其中，邓雪松等^[8]通过将叠层黏弹性体置于钢管内制成钢管叠层黏弹性阻尼器，该装置可有效减弱钢管局部屈曲，使其充分发挥耗能优势。周云等^[9-11]通过对钢管叠层黏弹性阻尼器进行往复加载试验，分析了阻尼器的工作机制、破坏特征和耗能性能，并建立了该阻尼器的承载力计算公式。He等^[12]、Zhou等^[13-14]提出一种新型橡胶阻尼器并进行单调和往复加载试验，研究了阻尼器在不同加载条件下的力学性能，并分析了阻尼器的疲劳特性。陈鹏等^[15]设计了一种橡胶隔震支座抗拉装置，并通过试验验证了工作性能。Wang等^[16]提出了一种新型组装式被动自适应隔震支座并进行试验，分析了该支座工作机制，并考察了不同工况下整个装置的横向力学性能。张增德等^[17-18]从叠层橡胶支座性能研究获得了竖向力学性能参数，并将叠层厚橡胶支座应用于结构体系转换层，该支座可有效延伸普通支座仅可单向耗能的特性。不难发现，波形钢板-橡胶构件间的黏结滑移性能是确保两种材料协同工作的必要条件，直接影响了波形钢板-橡胶结构构件的受力性能。然而，至今对波形钢板-橡胶界面之间的黏结滑移性能研究尚未开展，对其受力机制进行探讨具有一定必要性。

为此，本文开展了6个波形钢板-橡胶构件的黏结滑移性能试验，以探究波形钢板-橡胶构件受往复荷载作用的黏结滑移受力机制，进一步从耗能和界面应变分布角度分析界面黏结性能，并通过黏结长度和波形钢板表面粗糙度探究特征黏结

强度的影响规律，最后建立了波形钢板-橡胶构件的计算特征黏结强度公式，以期对相关构件的研究提供参考。

1 试验概况

1.1 试件设计

设计的波形钢板-橡胶试件示意图如图1所示，试件采用2块波形钢板内夹橡胶制作而成。其中，波形钢板的波脊和波谷的长度均为60 mm，钢板厚度为8 mm；橡胶边缘部位厚度为80 mm，其他尺寸则以紧贴波形钢板为齐。同时，为弱化边缘效应对界面边界黏结效果的影响，波形钢板左右两侧各比橡胶多20 mm。进一步在橡胶顶部留出170 mm空间以便橡胶夹具的安装，在橡胶底部预留50 mm为钢板与橡胶错动提供空间。波形钢板与橡胶通过胶黏剂进行黏结，选择采用单组份胶黏剂 BYN-1211，剥离强度为3.0 N/mm。

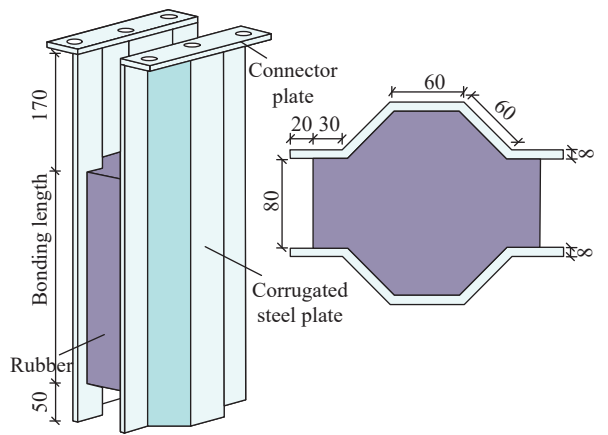


图1 波形钢板-橡胶试件示意图 (单位: mm)
Fig. 1 Diagram of corrugated steel plate-rubber specimens (Unit: mm)

为研究不同影响因素对波形钢板-橡胶界面间黏结性能的影响，以试件界面黏结长度、波形钢板表面粗糙度和试件加载方式为设计参数制作了6个试件，试件参数如表1所示。

表1 波形钢板-橡胶试件的基本参数
Table 1 Parameters of corrugated steel plate-rubber specimens

Specimen	Bonding length/mm	Roughness/mm	Loading mode
S-1	300	0.7	Push-out
S-2	200	0.7	Cycle
S-3	250	0.7	Cycle
S-4	300	0.7	Cycle
S-5	250	1.18	Cycle
S-6	250	0.416	Cycle

根据《钢及钢产品 力学性能试验取样位置及试样制备》(GB/T 2975—2018)^[19]在钢板母材切取样品,并根据《金属材料 拉伸试验:第1部分:室温试验方法》(GB/T 228.1—2021)^[20]对钢材进行拉伸试验,依据《硫化橡胶或热塑性橡胶拉伸应力应变性能的测定》(GB/T 528—2009)^[21]对橡胶进行了材料性能试验,所获得钢材和橡胶力学性能如表2和表3所示。

表2 钢板力学性能

Table 2 Mechanical properties of steel plate			
Plate	Thickness/mm	Yield strength/MPa	Peak strength/MPa
Q235	8	304	446

表3 橡胶力学性能

Table 3 Mechanical properties of rubber			
Shore A hardness/degree	$\sigma_a/(kN \cdot m^{-1})$	E/MPa	$\delta/\%$
70	19	2.68	330

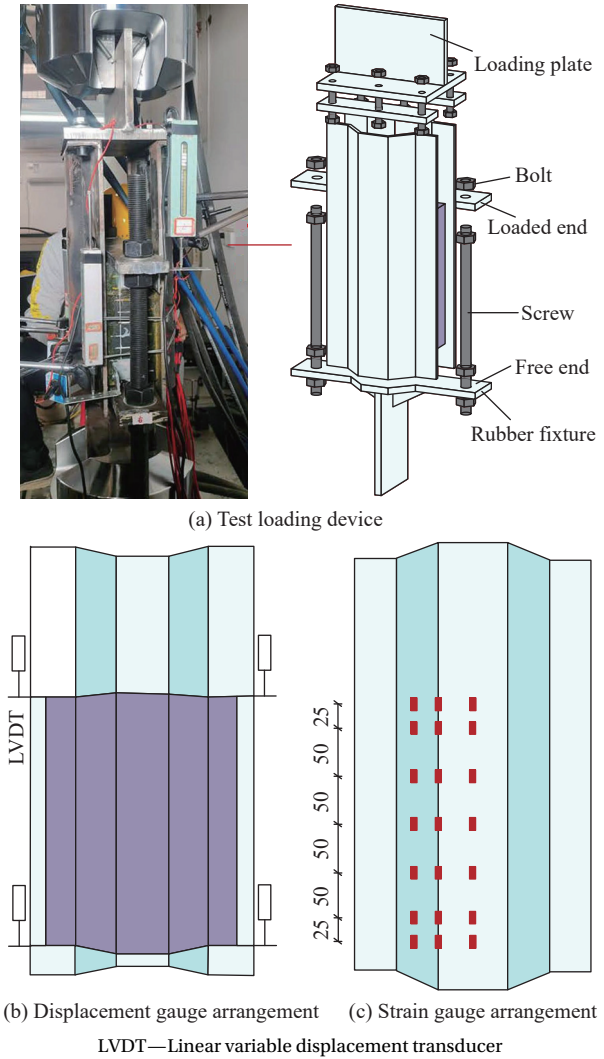
Notes: σ_a —Tear strength; E —Modulus of elasticity; δ —Elongation at break.

1.2 加载方案与测点布置

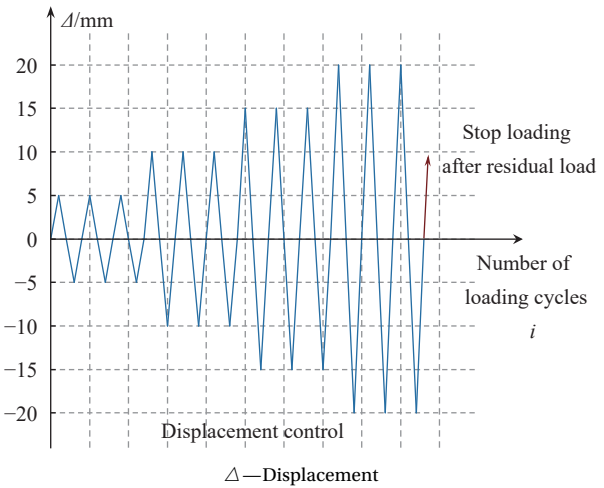
本试验的加载装置如图2(a)所示,为保证试件界面承受剪切作用,设计出橡胶夹具以固定橡胶位置,橡胶夹具底板为自由端,顶板为加载端;同时设计出加载板用于连接波形钢板和作动器,以实现波形钢板的竖向加载。规定作动器对试件向下压为第一次加载,即向下压为正;向上拉为第二次加载,即向上拉为负;后续表示统一为正向和负向。

本试验位移计布置如图2(b)所示,其中为精准测量试件加载端和自由端的滑移值,选择在橡胶4角各布置一个位移计,两端滑移值取相应位移计的平均值。同时为探究波形钢板应变分布对黏结性能的影响,分别在波形钢板的波谷、波角和波脊的中轴线处布置应变片,应变片布置如图2(c)所示。

根据《建筑抗震试验规程》(JGJ/T 101—2015)^[22],本试验采用位移控制的加载方式,先对试件 S-1 进行单调加载,以确定试件峰值荷载、残余荷载对应的滑移值。加载过程中初始加载速度 0.3 mm/min,残余荷载后,加载速度增加至 1 mm/min;待试件 S-1 加载结束后再加载试件 S-2~S-6,加载速度为 5 mm/min;残余荷载后停止加载,该试验加载制度如图3所示。



(b) Displacement gauge arrangement (c) Strain gauge arrangement
LVDT—Linear variable displacement transducer
图2 波形钢板-橡胶试件加载装置与测点分布(单位:mm)
Fig. 2 Loading device and measuring point distribution of corrugated steel plate-rubber specimens (Unit: mm)



△—Displacement
图3 波形钢板-橡胶试件加载制度示意图
Fig. 3 Loading regime diagram of corrugated steel plate-rubber specimens

2 试验现象及结果

2.1 试验过程

试件典型破坏形态如图 4 所示。加载初期，试件两端错动微小，波形钢板-橡胶试件的黏结界面未出现损伤；达到极限荷载的 5%~15% 时，除试件 S-4 外，其余试件均开始发生相互错动，并伴随胶层出现气泡。随荷载增加，试件 S-5、S-6 胶层气泡逐渐转变为拉丝状，其余试件胶层气泡亦随后转变为拉丝状；并且橡胶开始发生变形，其中试件 S-2 反向加载时橡胶变形恢复，说明橡胶具有迟滞效应；试件 S-3、S-5 橡胶变形整体呈倒梯形；试件 S-1 靠近加载端的橡胶发生弯曲。继续增加荷载，试件出现孔洞并随荷载增大不断增多且扩大，界面裂缝扩展，此时试件 S-4 开始产生错动，且随荷载增加橡胶变形呈倒梯形；试件 S-1 和试件 S-6 橡胶变形呈三角形。试件的滑移量随荷载的增加不断增大，橡胶变形逐渐明显。随界面受损不断累积，荷载增加速率减慢，当外部荷载接近其极限点时，试件不断地出现“嘶”

的声音，拉丝状胶黏剂发生断裂，界面裂缝不断延伸直至界面贯通；胶层发生内聚破坏 (CF)，在荷载作用下，胶层不断卷积，其中试件 S-6 胶层卷积明显，胶团出现外溢；此时，荷载缓降；随界面滑移增大，胶黏剂被全部拉断，荷载骤然下降；波形钢板-橡胶界面由胶黏剂提供的抗剪力退出工作，此时黏结力主要取决于界面的摩阻力和被拉断的胶黏剂发生内聚破坏进行卷积提供的拉力，波形钢板与橡胶界面遭受了较为严重的损伤。试件随荷载大幅度减小达到了新的平衡阶段，荷载-滑移曲线逐渐平缓，此时，荷载随滑移量的增加基本上稳定不变。

为进一步探究波形钢板与橡胶界面破坏机制，试验结束后将波形钢板与橡胶剥离，如图 5 所示。波形钢板与橡胶界面受荷载作用相互剪切，且胶黏剂在波形钢板与橡胶挤压力作用下沿黏结长度方向大约 45° 出现斜向应力并逐渐剪切为拉丝状，剪切应力 σ_τ 不断增大，使得橡胶向外膨胀变形。当剪切应力 σ_τ 大于界面可承受极限应力，拉丝状

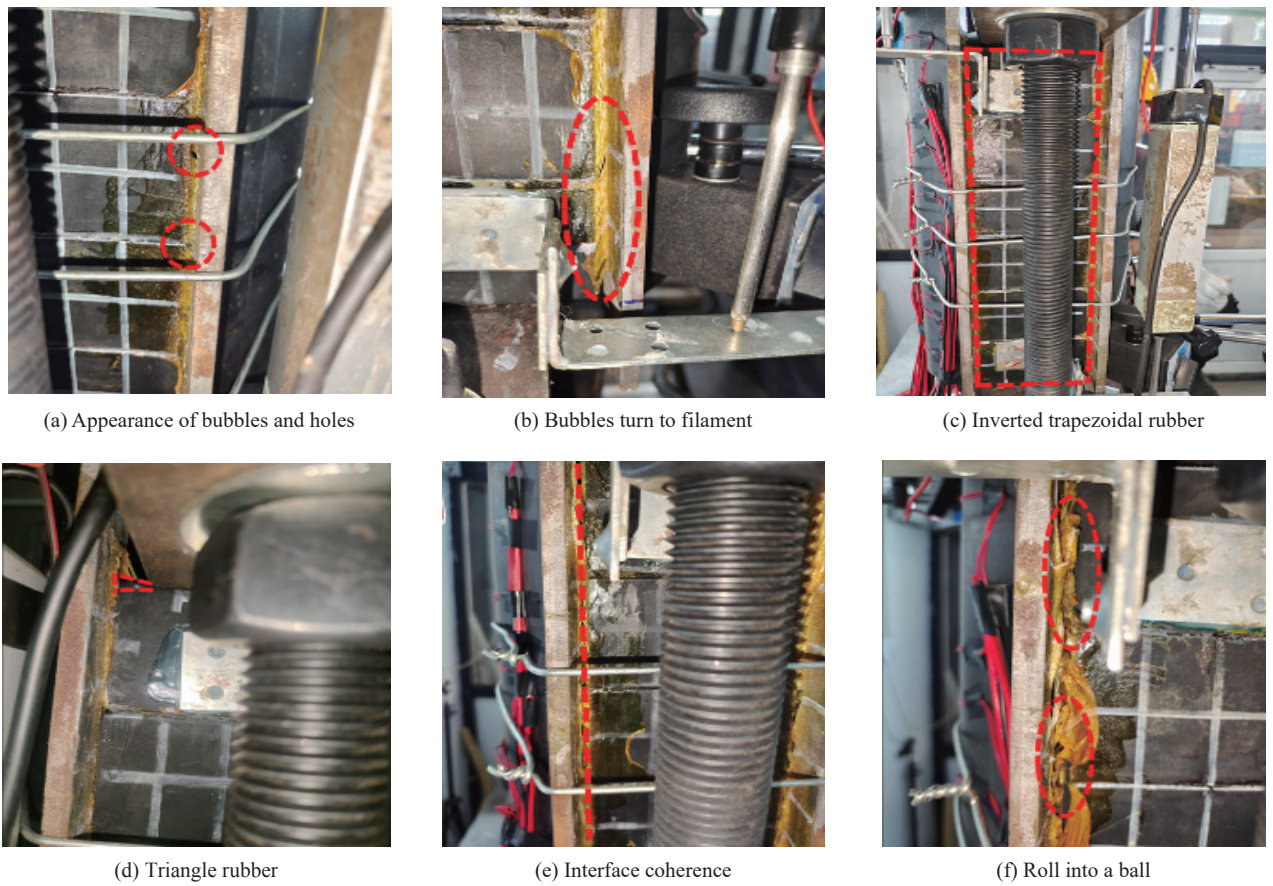
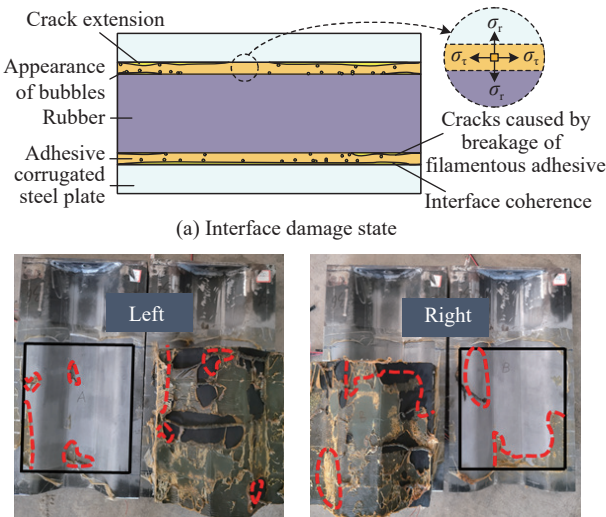
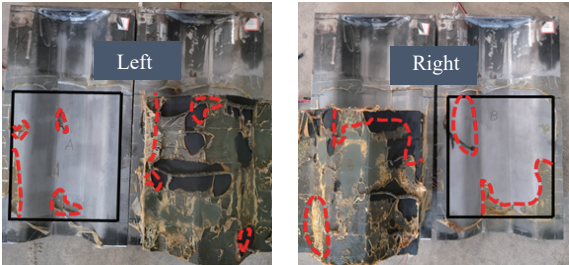


图 4 波形钢板-橡胶试件典型破坏形态

Fig. 4 Typical failure modes of corrugated steel plate-rubber specimens



(a) Interface damage state



(b) Bonding interface

σ_{τ} —Shear stress; σ_{σ} —Compressive stress

图5 波形钢板-橡胶试件界面破坏示意图

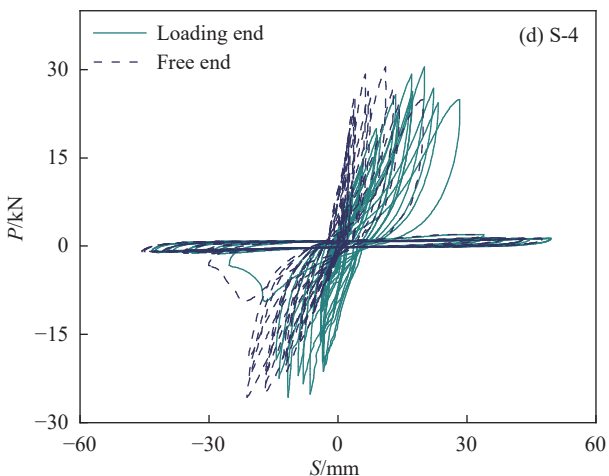
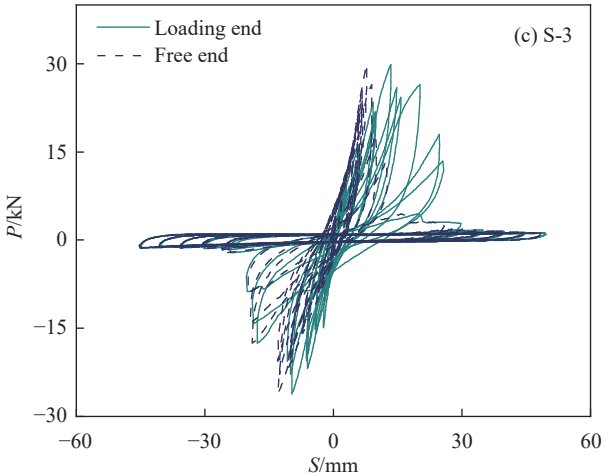
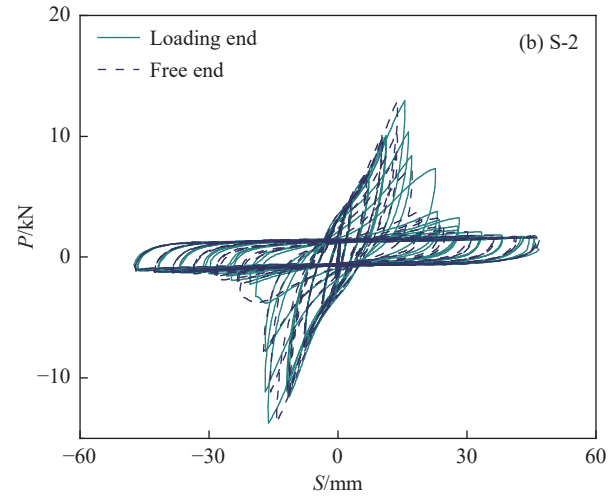
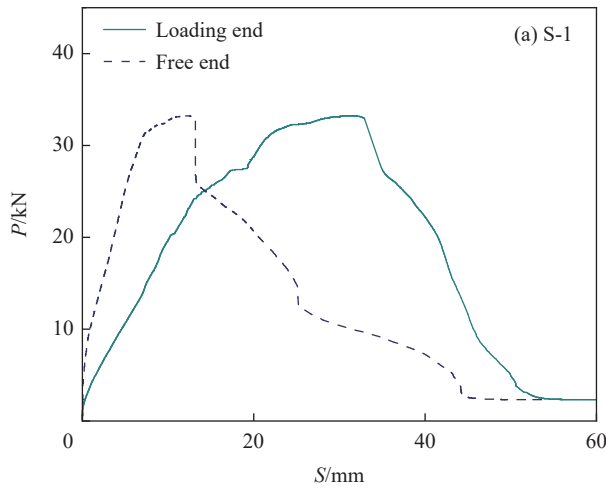
Fig. 5 Interface damage diagram of corrugated steel plate-rubber specimens

胶黏剂断裂。因橡胶具有迟滞效应和 Mullins 效应，卸载时并未立即恢复原状，使得橡胶继续挤压胶黏剂，因而压应力 σ_{σ} 未急剧下降。由于压应力的存在使得橡胶与波形钢板间摩阻力增大，为破坏后胶黏剂发生内聚破坏提供一定条件。

对于胶黏剂的主要破坏类型，参考《胶黏剂主要破坏类型的表示法》(GB/T 16997—1997)^[23]，试件剥离后波形钢板表面有比较明显的胶黏剂残留，中部黏结区域胶黏剂受到明显的约束，波形钢板与橡胶黏合良好，因而剥离波形钢板时胶黏剂被完全剥离，仅在波形钢板上留下少量残留。橡胶边缘有较大的凸出变形，损伤发生在胶黏剂内部，胶黏剂残留在橡胶和波形钢板上，试件界面破坏均为胶黏剂内聚破坏。在往复荷载下，胶黏剂卷积更加明显。

2.2 试件的荷载-滑移曲线

试件的荷载 P -滑移 S 曲线如图 6 所示，具有以下特点：



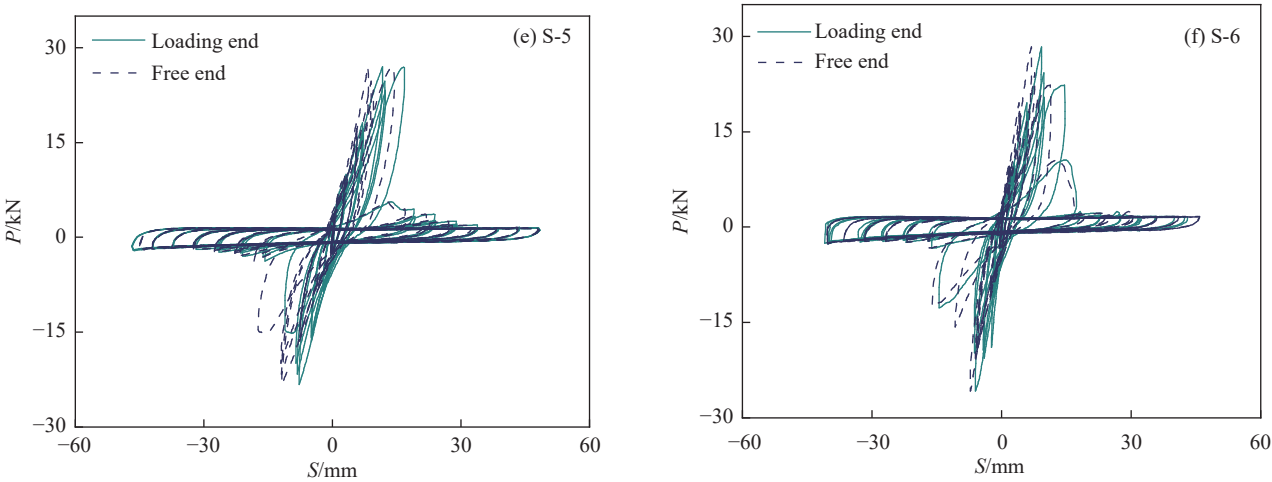


图6 波形钢板-橡胶试件的荷载 P -滑移 S 曲线

Fig. 6 Load P -slip S curves of corrugated steel plate-rubber specimens

(1) 在残余荷载前，波形钢板-橡胶试件两端的 P - S 曲线变化趋势大致相同，但两端的滑移存在一定的滞后，这是由于传力方向不同，正向加载时加载端优先受力，加载端曲线先于自由端，反之亦然；而在残余荷载后，此时试件界面被破坏，残余荷载不足以使橡胶和波形钢板发生变形，因此加载端和自由端滑移基本一致；

(2) 往复试件在达到极限荷载前，加载位移第一圈峰值点随荷载增大呈 S 型增长，且由于胶黏剂硬化后是一种类橡胶材料，存在 Mullins 效应^[24]，卸载后不能恢复原状，这表明加卸载会使试件发生损伤。极限荷载后，荷载随加载位移的增加而下降至残余荷载，随后加载位移第一圈峰值点基本保持水平；

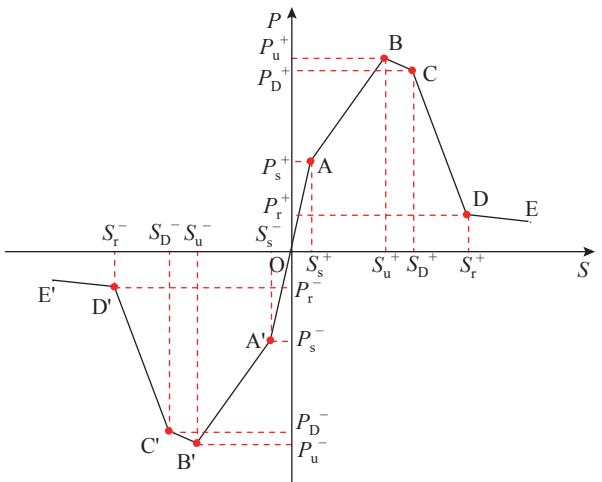
(3) 在同一级加载位移下，荷载随循环圈数的增加而减小，并且加载刚度和峰值荷载也随之降低，但滑移值增大，这说明循环圈数进一步加大了界面损伤；

(4) 往复试件在加载后期，由于橡胶的 Mullins 效应^[24]，使得滞回环呈现出“捏拢现象”，这表明波形钢板与橡胶之间产生了较大的滑移。

2.3 试件破坏过程分析

通过对试验结果进行归纳分析，建立试件的特征荷载-滑移曲线如图 7 所示，其被定义为 8 个特征点和 5 个破坏阶段，进一步提取试件特征点对应的特征值如表 4 所示。被定义的 8 个特征点如下：

(1) 微滑移点 A、A'。加载初期，界面相对滑移量微小，荷载和滑移之间呈线性关系。达到极



P_s^-, P_s^+ —Microslip load; S_s^-, S_s^+ —Displacement corresponding to microslip load; P_u^-, P_u^+ —Peak load; S_u^-, S_u^+ —Displacement corresponding to peak load; P_D^-, P_D^+ —Destructive load; S_D^-, S_D^+ —Displacement corresponding to destructive load; P_r^-, P_r^+ —Residual load; S_r^-, S_r^+ —Displacement corresponding to residual load

图7 波形钢板-橡胶试件的特征荷载-滑移曲线

Fig. 7 Characteristic load-slip curve of corrugated steel plate-rubber specimens

限荷载的 5%~15% 时，曲线斜率发生变化，定义该点为微滑移点 A 和 A'。若进一步增加荷载，界面因受到挤压开始出现胶层气泡，并随荷载增加转变为拉丝状，界面将产生损伤；

(2) 极限荷载点 B、B'。此时承载力达到界面可承受的极限值，若继续加载，拉丝状胶黏剂发生断裂，胶黏剂提供的力将逐渐退出工作，界面黏结力由未被拉断的胶黏剂提供的抗剪力、界面摩擦阻力和被拉断的胶黏剂发生内聚破坏进行卷积分担，该点后荷载-滑移曲线缓降；

表 4 波形钢板-橡胶试件的特征荷载值

Table 4 Each characteristic load of corrugated steel plate-rubber specimens

Specimen	P_s^-/kN	P_s^+/kN	P_u^-/kN	P_u^+/kN	P_D^-/kN	P_D^+/kN	P_r^-/kN	P_r^+/kN
S-1	—	2.27	—	33.20	—	26.68	—	2.38
S-2	-1.72	1.35	-13.71	12.94	-3.79	7.35	-1.36	1.82
S-3	-2.92	2.79	-26.14	29.83	-17.53	26.43	-1.45	1.75
S-4	-1.70	2.21	-25.71	30.46	-9.43	24.93	-1.21	1.45
S-5	-2.48	3.28	-23.30	27.00	-15.20	26.89	-1.91	1.94
S-6	-3.38	3.12	-25.80	28.36	-12.70	22.34	-2.23	1.93

(3) 破坏荷载点 C、C'。胶黏剂被全部拉断，该点之后胶黏剂提供的抗剪力彻底退出工作，该点为曲线缓降转为陡降的转折点；

(4) 残余荷载点 D、D'。试件荷载下降达到新的平衡点，该点后荷载随滑移量增加基本保持不变。

而 5 个破坏阶段依次为

(1) 微滑移阶段 (OA 段、OA'段)

荷载从 0 逐渐增加，P-S 曲线呈现线性增长，由于荷载较小，波形钢板-橡胶界面几乎没有发生滑移，界面黏结力主要由胶黏剂提供的抗剪力承担。当胶黏剂拉应力达到弹性极限值时，受力端一侧的胶黏剂出现错动。

(2) 滑移阶段 (AB 段、A'B'段)

随荷载继续增加，胶黏剂开始发生剪切破坏，试件刚度逐渐下降；该阶段胶层出现气泡并逐渐转变为拉丝状，试件黏结滑移区从两端向中间扩展，橡胶发生变形并随荷载增加不断加剧；胶黏剂提供的抗剪力在界面黏结力的占比中逐渐减小，而界面摩阻力占比逐渐增大，但界面黏结力仍由胶黏剂提供的抗剪力承担，界面摩阻力影响微小。

(3) 破坏阶段 (BC 段、B'C'段)

荷载达到极限荷载点后，胶黏剂产生断裂，提供的抗剪力不断丧失，荷载缓降。继续加载时，界面黏结力由未断裂的胶黏剂提供的抗剪力、界面摩阻力和断裂的胶黏剂发生内聚破坏进行卷积提供的拉力承担。

(4) 曲线下降阶段 (CD 段、C'D'段)

当胶黏剂全部断裂，提供的抗剪力完全丧失，荷载陡降；继续加载时，试件的滑移量迅速增加，波形钢板-橡胶界面的黏结力由胶黏剂断裂后发生内聚破坏进行卷积提供的拉力和界面间摩阻力承担。随荷载的快速降低，曲线达到新的平衡状态。

(5) 残余阶段 (DE 段、D'E'段)

随试件滑移量增加，界面摩阻力和胶黏剂发生内聚破坏进行卷积提供的拉力逐步减小并趋于稳定，荷载维持在极限荷载的 5%~10%。

2.4 试件界面黏结耗能

界面黏结能通常结合等效阻尼比 (ξ_{eq}) 分析^[1]，计算公式为

$$\xi_{eq} = \frac{1}{2\pi} \frac{S_{AECF}}{S_{OAB} + S_{OCD}}$$

(1)

式中： S_{AECF} 为图 8 中滞回环的面积； S_{OAB} 、 S_{OCD} 为相应三角形的面积。

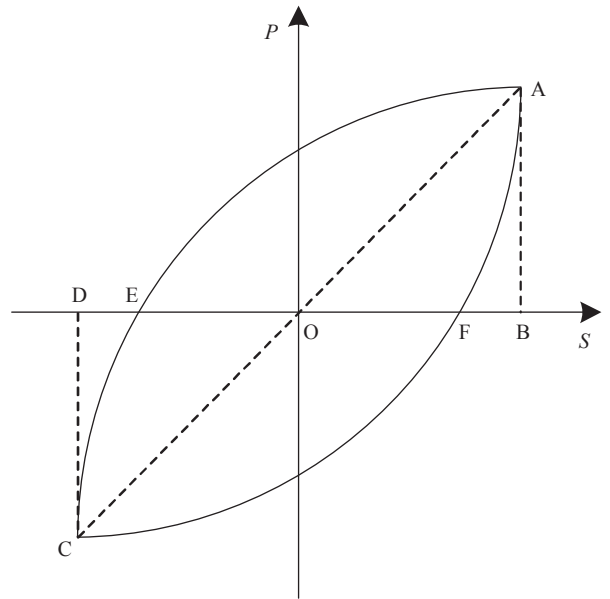


图 8 波形钢板-橡胶试件的界面黏结耗能计算简图
Fig. 8 Calculation diagram of interface bonding energy consumption of corrugated steel plate-rubber specimens

根据式 (1) 计算可得到试件的等效阻尼比，其结果如图 9 所示，通过对设计参数进行对比分析可知：

(1) 黏结长度的长短显著影响试件的等效阻尼比。黏结长度 L_e 为 200 mm 的等效阻尼比高于 250 mm 和 300 mm。这主要是由于在加载初期，由于试件在往复荷载作用下加载端和自由端均受力，试件两端均进入塑性阶段，产生较大的塑性变形。随后由于黏结长度为 200 mm 的试件界面传力速度更快，等效阻尼比也随加载位移的增加

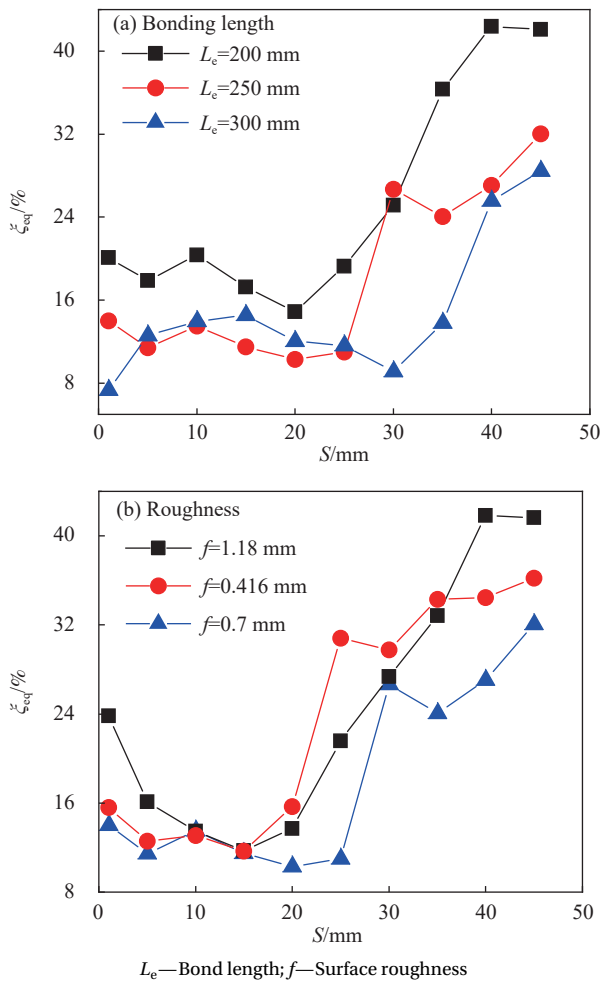


图9 波形钢板-橡胶试件的等效阻尼比 ξ_{eq} -加载位移曲线
Fig. 9 Equivalent damping ratio ξ_{eq} -loading displacement curves of corrugated steel plate-rubber specimens

而迅速增大；

(2) 波纹钢板表面粗糙度对试件的等效阻尼比有一定的影响。在加载初期，粗糙度为 1.18 mm 的试件由于较小的粗糙度，首先进入塑性阶段进行耗能，而粗糙度为 0.7 mm 和 0.416 mm 的试件，因其相对 1.18 mm 具有较大的粗糙度，在加载前期的耗能性能差异并不明显；随后粗糙度为 1.18 mm 和 0.416 mm 试件达到极限荷载点后，等效阻尼比随位移增加而快速增大，产生更大耗能。这说明粗糙度在 0.416~1.18 mm 范围内，并非粗糙度越小，界面传力速度越快，合理控制粗糙度，可改善试件界面耗能，提高界面黏结性能。

2.5 试件的波谷、波脊和波角应变分析

分别对典型试件的波谷、波脊和波角进行应变分析，其结果如图 10 所示。图中坐标原点为加载端，应变片高度最高点为自由端，其测点位置

如图 2 所示。选取单调试件 S-1 和往复试件 S-6 为例进行分析。

通过图 10 可以发现，对于试件 S-1，加载端波形钢板与加载板接触，使得加载端优先受力，加载端的应变增幅大于自由端；对于试件 S-6，加载端和自由端均有较大的应变增幅，这是由于试件受往复荷载作用时，自由端和加载端均优先受力，荷载作用下内力传递最为强烈^[25]，因此试件的优先受力端部存在应变突变现象。

随荷载增加，橡胶发生弯曲变形且持续加剧，由于试件 S-1 波脊处靠近变形区，在距加载端不同位置处均产生应变，但拉压变形程度不一致，使得钢板拉压交替呈波浪形，而试件 S-1 波谷和波角处距离变形区相对较远，传递的力相对较弱，故仅在滑移大于 $3/4S_u^+$ (峰值荷载对应的滑移值) 时，距加载端 125 mm 处应变产生突变，而远离此点受到的应变影响较为微弱。试件 S-1 加载端的黏结应变值符号与自由端的相反^[26]，这是由于加载端存在滑移区，自由端处橡胶在受到橡胶夹具提供的向上的反力和胶黏剂对钢板施加向上的阻力，使得自由端钢板局部产生受拉区，单调试件 S-1 出现了应变过零现象。

对于往复试件 S-6，随荷载的增大，橡胶变形使拉丝状胶黏剂下侧的钢板在受力时出现了拉伸形变，而上侧发生了压缩形变，拉丝状胶黏剂之间的钢板拉压交替，抵消了部分拉压变形，但界面内部的受力状态不同，拉压变形程度不一致，因此试件应变呈现波浪形。

3 特征参数及影响因素分析

3.1 特征黏结应力

为研究波形钢板-橡胶试件加载端特征黏结强度，可用平均黏结应力 τ 表征界面的黏结性能^[15, 26]，通过下式计算得到每个试件的平均黏结应力，如表 5 所示。

$$\tau = \frac{F}{DL_a} \tag{2}$$

$$D = 4(D_1 + D_2) \tag{3}$$

式中： F 为施加的荷载值； D 为截面黏结长度； L_a 为波形钢板的黏结长度； D_1 为波形钢板波谷长度； D_2 为波形钢板波脊长度。

3.2 影响因素分析

3.2.1 加载方式

单调试件 S-1 和往复试件 S-4 的荷载-滑移曲

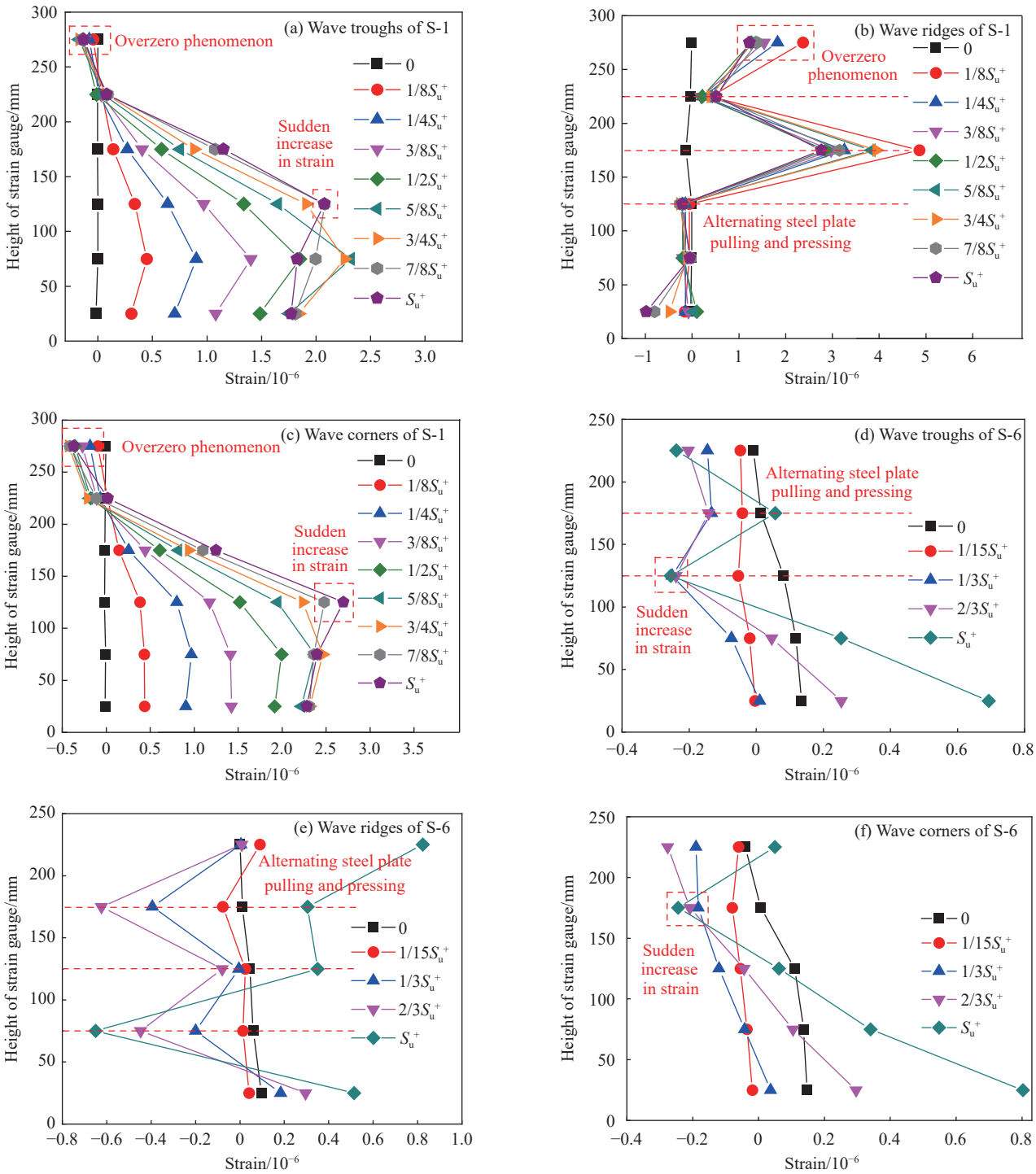


图 10 波形钢板-橡胶试件的不同滑移水平下应变分布

Fig. 10 Distribution of strain at various levels of slip of corrugated steel plate-rubber specimens

线如图 11 所示。在相同条件下，试件 S-4 和试件 S-1 的极限荷载分别为 30.46 kN 和 33.20 kN，残余黏结滑移分别为 38.98 mm 和 54.93 mm，往复加载相比于单调加载，极限黏结强度降低 9% 左右，而残余黏结滑移降低了约 29%，这说明往复加载对界面的黏结性能产生更不利影响。在达到极限

荷载后，试件 S-1 下降曲线相较于试件 S-4 较为平缓，是由于单调加载对界面损伤相对较小，刚度退化速度较慢。

3.2.2 黏结长度

黏结长度对波形钢板-橡胶黏结滑移的影响如图 12 所示。通过比较和分析正向和负向特征黏结

表 5 波形钢板-橡胶试件的平均黏结应力
Table 5 Average bond stress of corrugated steel plate-rubber specimens

Specimen	τ_s^- /kPa	τ_s^+ /kPa	τ_u^- /kPa	τ_u^+ /kPa	τ_D^- /kPa	τ_D^+ /kPa	τ_r^- /kPa	τ_r^+ /kPa
S-1	—	15.76	—	230.56	—	185.28	—	16.53
S-2	-17.92	14.06	-142.81	134.79	-39.48	76.56	-14.17	18.96
S-3	-24.33	23.25	-217.83	248.58	-146.08	220.25	-12.08	14.58
S-4	-11.81	15.35	-178.54	211.53	-65.49	173.13	-8.40	10.07
S-5	-20.67	27.33	-194.17	225.00	-126.67	224.08	-15.92	16.17
S-6	-28.17	26.00	-215.00	236.33	-105.83	186.17	-18.58	16.08

Notes: τ_s^- , τ_s^+ —Microslip stress; τ_u^- , τ_u^+ —Peak stress; τ_D^- , τ_D^+ —Destructive stress; τ_r^- , τ_r^+ —Residual stress.

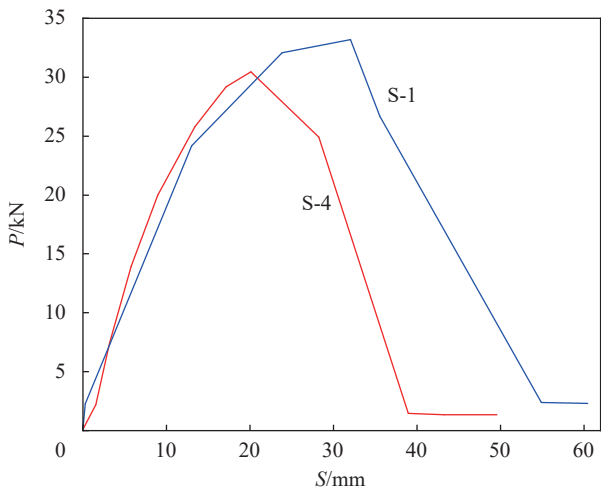


图 11 波形钢板-橡胶试件的加载方式对界面黏结性能的影响
Fig. 11 Effect of loading mode on interface bonding performance of corrugated steel plate-rubber specimens

强度值与黏结长度的相互关系可知，正负向特征值随黏结长度变化规律相似，随黏结长度的增加，试件的微滑移特征黏结强度 τ_s 、极限特征黏结强度 τ_u 和破坏特征黏结强度 τ_D 均呈现出先增后减，而残余特征黏结强度 τ_r 呈明显负相关关系。 $L_e=250\text{ mm}$ 比 $L_e=200\text{ mm}$ 的负向极限特征黏结强度增长 52.53%，正向极限特征黏结强度增长 84.42%； $L_e=300\text{ mm}$ 比 $L_e=250\text{ mm}$ 的负向极限特征黏结强度减小 18.04%，正向极限特征黏结强度减小 14.91%。这主要是由于当试件接近极限特征黏结强度时，拉丝状胶黏剂发生断裂，胶黏剂提供的抗剪力逐步丧失，相比 $L_e=200\text{ mm}$ 的试件， $L_e=250\text{ mm}$ 的试件因具有更大的黏结面积，为被拉断的胶黏剂发生内聚破坏提供更大的卷积区域，因而增强了两面黏结面的被拉断的胶黏剂发生内聚破坏进行卷积提供的拉力，使得极限特征黏结强度更大。而随着黏结长度的增加，极限特征黏结强度逐渐减弱，这说明在加载过程中，黏结应力是一个从加载端不断向自由端传递的过程，超

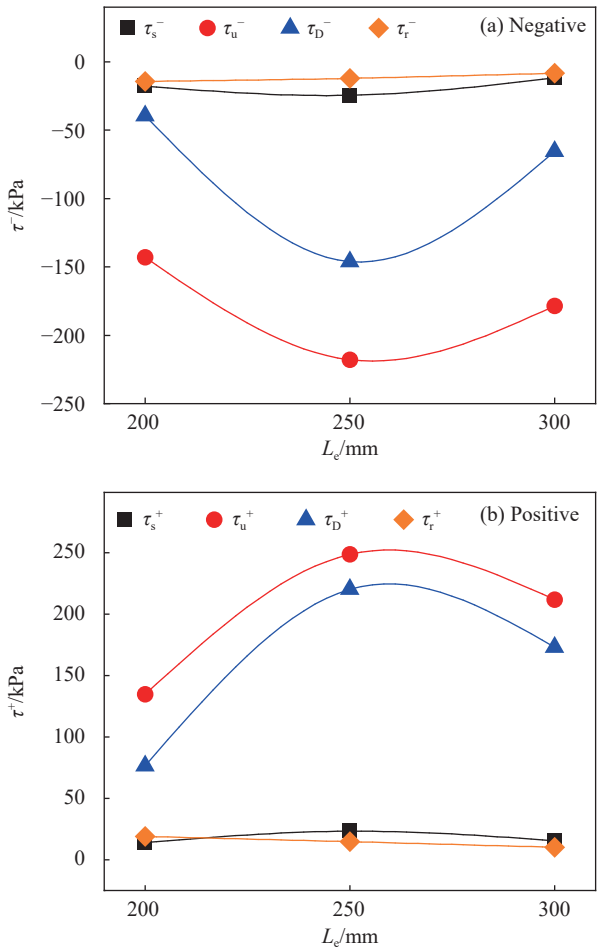


图 12 波形钢板-橡胶试件的黏结长度对界面黏结性能的影响
Fig. 12 Effects of bond lengths on interface bonding performance of corrugated steel plate-rubber specimens

过一定长度后，应力将不再传递^[27]，在该区域内极限特征黏结强度随黏结长度的增加而增大，直至试件彻底发生内聚破坏。

3.2.3 波形钢板表面粗糙度

特征黏结强度值与波形钢板表面粗糙度的相互关系如图 13 所示。波形钢板表面粗糙度对极限特征黏结强度和破坏特征黏结强度影响较大，这主要是由于在加载过程中，随着荷载的增大，橡

胶向外膨胀挤压,压应力增大,当达到极限荷载后,拉丝状胶黏剂逐渐断裂,提供的力逐渐降低,而摩擦力在黏结力中占比增大,对构件提供较强的约束,因而增强了两面黏结面的摩擦阻力。但由于界面破坏加剧,产生较大的滑移,特征黏结强度逐渐降低。

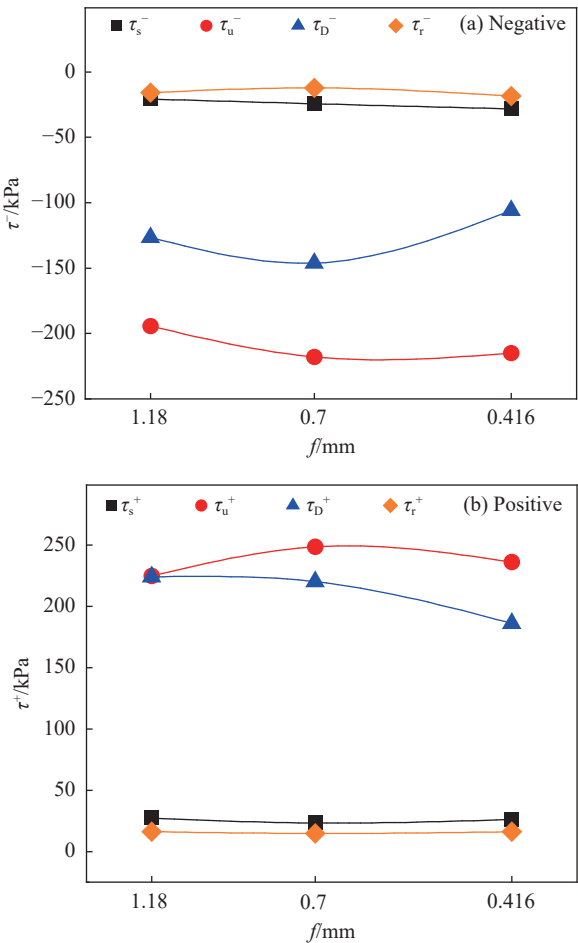


图 13 波形钢板-橡胶试件表面粗糙度对界面黏结性能的影响
Fig. 13 Effects of surface roughness on interface bonding performance of corrugated steel plate-rubber specimens

4 特征黏结强度计算

4.1 特征黏结强度计算式

针对各因素对各特征黏结应力的影响和相互作用,对往复荷载作用下试件的试验数据回归分析,分别建立了波形钢板-橡胶试件特征黏结强度的计算式。

(1) 微滑移特征黏结强度计算公式:

(τs-)′ = 244.03 - 2.31Le + 0.0048(Le)² + 9.59f (4)

(τs+)′ = -246.11 + 2.15Le - 0.0043(Le)² + 2.45f (5)

式中: Le为波形钢板的黏结长度; f为波形钢板表面粗糙度; (τs-)′、(τs+)′分别表示负向和正向的微滑移黏结强度计算公式。

(2) 极限特征黏结强度计算公式:

(τu-)′ = 1062.28 - 9.71Le + 0.019(Le)² - 11.70/f (6)

(τu+)′ = -1533.12 + 13.33Le - 0.025(Le)² + 5.22/f (7)

式中: (τu-)′、(τu+)′分别表示负向和正向的极限黏结强度计算公式。

(3) 破坏特征黏结强度计算公式:

(τD-)′ = 1774.14 - 15.00Le + 0.0294(Le)² - 19.96ln(f) (8)

(τD+)′ = -2150.81 + 18.03Le - 0.034(Le)² + 36.34ln(f) (9)

式中: (τD-)′、(τD+)′分别表示负向和正向的破坏黏结强度计算公式。

(4) 残余特征黏结强度计算公式:

(τr-)′ = -120.06 + 14.05ln(Le) + 76.45f - 45.70(f)² (10)

(τr+)′ = 144.37 - 21.84ln(Le) - 21.82f + 13.75(f)² (11)

式中: (τr-)′、(τr+)′分别表示负向和正向的残余黏结强度计算公式。

4.2 各特征黏结强度计算值与试验值的对比

各特征黏结强度计算结果如表 6 所示。经过对比分析后发现,波形钢板-橡胶试件的计算值与试验值较为接近,误差较小;表 7 最后一行平均值可见,计算值与试验值的比值接近 1,这说明考虑了黏结长度和波形钢板表面粗糙度的特征黏结强度计算公式能够较好地反映试件的特征黏结强度,具有一定的可靠性,为波形钢板和橡胶界面黏结滑移提供了理论依据,对工程实际具有一定的参考意义。

5 结论

基于波形钢板-橡胶的往复和单调加载试验,研究了波形钢板-橡胶在不同加载方式、黏结长度和波形钢板表面粗糙度对黏结性能的影响。

(1) 根据波形钢板-橡胶试件受往复荷载作用的荷载-滑移曲线,可将黏结破坏过程划分为 5 个不同阶段,即微滑移、滑移、破坏、曲线下降以及残余阶段。

(2) 从能量角度对波形钢板-橡胶试件界面的

表 6 波形钢板-橡胶试件的各特征黏结强度计算结果

Table 6 Calculation results of each characteristic bond strength of corrugated steel plate-rubber specimens								
Specimen	$(\tau_s^-)/\text{kPa}$	$(\tau_s^+)/\text{kPa}$	$(\tau_u^-)/\text{kPa}$	$(\tau_u^+)/\text{kPa}$	$(\tau_D^-)/\text{kPa}$	$(\tau_D^+)/\text{kPa}$	$(\tau_r^-)/\text{kPa}$	$(\tau_r^+)/\text{kPa}$
S-2	-19.26	13.61	-136.43	140.34	-42.74	82.23	-14.50	20.12
S-3	-26.76	24.36	-194.43	244.34	-131.24	218.73	-11.36	15.24
S-4	-10.26	13.61	-157.43	223.34	-72.74	185.23	-8.80	11.26
S-5	-22.15	25.53	-187.64	241.30	-141.66	237.70	-15.91	17.18
S-6	-29.48	23.66	-205.85	249.43	-120.85	199.82	-18.59	17.08

Notes: (τ_s^-) , (τ_s^+) —Calculated value of microslip strength; (τ_u^-) , (τ_u^+) —Calculated value of peak strength; (τ_D^-) , (τ_D^+) —Calculated value of destructive strength; (τ_r^-) , (τ_r^+) —Calculated value of residual strength.

表 7 波形钢板-橡胶试件的各特征黏结强度计算结果与试验结果对比

Table 7 Comparison of calculated and test results of each characteristic bond strength of corrugated steel plate-rubber specimens								
Specimen	$(\tau_s^-)/\tau_s^-$	$(\tau_s^+)/\tau_s^+$	$(\tau_u^-)/\tau_u^-$	$(\tau_u^+)/\tau_u^+$	$(\tau_D^-)/\tau_D^-$	$(\tau_D^+)/\tau_D^+$	$(\tau_r^-)/\tau_r^-$	$(\tau_r^+)/\tau_r^+$
S-2	1.07	0.97	0.96	1.04	1.08	1.07	1.02	1.06
S-3	1.10	1.05	0.89	0.98	0.90	0.99	0.94	1.05
S-4	0.87	0.89	0.88	1.06	1.11	1.07	1.05	1.12
S-5	1.07	0.93	0.97	1.07	1.12	1.06	1.00	1.06
S-6	1.05	0.91	0.96	1.06	1.14	1.07	1.00	1.06
Average value	1.032	0.950	0.932	1.042	1.070	1.052	1.002	1.070

黏结性能进行分析，黏结长度的长短显著影响界面耗能。合理控制粗糙度，可改善试件界面耗能，提高界面黏结性能。

(3) 针对往复和单调加载试件应变结果中应变突增、过零点现象的出现以及呈现波浪形的应变分布现象分别分析。得出波形钢板-橡胶构件在荷载较大时，橡胶发生变形，界面内部不同位置处受力不同，应变发生突变且波脊处影响最大。

(4) 针对波形钢板-橡胶试件不同影响因素分析表明相较于单调加载，往复加载下试件的残余黏结滑移降低 29%，对界面的黏结性能产生更不利影响；同时对特征黏结强度随黏结长度和粗糙度的变化规律分析发现，波形钢板-橡胶试件的极限特征黏结强度随黏结长度和粗糙度的增大呈现出先增加后逐步减弱。

(5) 综合考虑试验结果和影响因素分析后，提出了针对波形钢板-橡胶的特征黏结强度计算式，并将其与试验结果进行了对比，两者之间表现出较好的吻合度。

参考文献：

[1] LEWANDOWSKI R, SLOWIK M, PRZYCHODZKI M. Parameters identification of fractional models of viscoelastic dampers and fluids[J]. Structural Engineering and Mechanics, 2017, 63(2): 181-193.

[2] AL-ANANY Y M, MOUSTAFA M A, TAIT M J. Modeling and evaluation of a seismically isolated bridge using unbonded

fiber-reinforced elastomeric isolators[J]. Earthquake Spectra, 2018, 34(1): 145-168.

[3] SIERRA I E M, LOSANNO D, STRANO S, et al. Development and experimental behavior of HDR seismic isolators for low-rise residential buildings[J]. Engineering Structures, 2019, 183: 894-906.

[4] 王威, 李元刚, 苏三庆, 等. 波形钢板混凝土黏结滑移性能试验研究与数值模拟分析 [J]. 土木工程学报, 2019, 52(11): 13-24, 44.

WANG Wei, LI Yuangang, SU Sanqing, et al. Experimental study and numerical simulation on bond-slip behavior between corrugated steel plate and concrete[J]. China Civil Engineering Journal, 2019, 52(11): 13-24, 44(in Chinese).

[5] 王威, 李鹏洛, 林忠良, 等. 波纹钢板-混凝土界面能耗及其本构关系 [J]. 复合材料学报, 2024, 41(3): 1588-1600.

WANG Wei, LI Pengluo, LIN Zhongliang, et al. Energy consumption and constitutive relationship of interface between corrugated steel plate and concrete[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2024, 41(3): 1588-1600(in Chinese).

[6] LI Y, WANG W, SU S, et al. Seismic performance assessment of eccentrically braced steel frame using demountable-metallic-corrugated-shear-panel dampers[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2023, 207: 107972.

[7] KUTENEVA S V, GLADKOVSKY S V, VICHUZHANIN D I, et al. Microstructure and properties of layered metal/rubber composites subjected to cyclic and impact loading[J]. Composite Structures, 2022, 285: 115078.

[8] 邓雪松, 李家乐, 周云, 等. 双曲型钢管叠层黏弹性阻尼器性能分析研究 [J]. 土木工程学报, 2020, 53(S2): 129-136.

DENG Xuesong, LI Jiale, ZHOU Yun, et al. Performance analysis of laminated viscoelastic body filed hyperbolic

type steel tube damper[J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(S2): 129-136(in Chinese).

[9] ZHOU Y, LI J, SHI F, et al. Theoretical, experimental and numerical studies on a novel laminated viscoelastomer-filled steel tube damper[J]. Structures, 2022, 45: 1434-1451.

[10] 周云, 吴胜, 李家乐. 钢管叠层黏弹性阻尼器设计方法 [J]. 建筑结构学报, 2023, 44(3): 79-86.
ZHOU Yun, WU Sheng, LI Jiale. Design method of laminated viscoelastic body filled steel tube damper[J]. Journal of Building Structures, 2023, 44(3): 79-86(in Chinese).

[11] 周云, 李家乐, 钟根全, 等. 钢管叠层黏弹性阻尼器性能研究 [J]. 土木工程学报, 2023, 56(10): 1-10.
ZHOU Yun, LI Jiale, ZHONG Genquan, et al. Research on properties of laminated viscoelastic body filled steel tube damper[J]. China Civil Engineering Journal, 2023, 56(10): 1-10(in Chinese).

[12] HE Z, SHI F, LIN Z, et al. Experimental characterization on cyclic stability behavior of a high-damping viscoelastic damper[J]. Construction and Building Materials, 2023, 371: 130749.

[13] ZHOU Y, LI D, SHI F, et al. Experimental study on mechanical properties of the hybrid lead viscoelastic damper[J]. Engineering Structures, 2021, 246: 113073.

[14] ZHOU Y, SHI F, OZBULUT O E, et al. Experimental characterization and analytical modeling of a large capacity high-damping rubber damper[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2018, 25(6): e2183.

[15] 陈鹏, 周颖, 刘璐, 等. 橡胶隔震支座抗拉装置受力性能试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2017, 38(7): 113-119.
CHEN Peng, ZHOU Ying, LIU Lu, et al. Experimental research on mechanical performance of tension-resistant device for rubber bearings[J]. Journal of Building Structures, 2017, 38(7): 113-119(in Chinese).

[16] WANG S, YUAN Y, TAN P, et al. Experimental study and numerical model of a new passive adaptive isolation bearing[J]. Engineering Structures, 2024, 308: 118044.

[17] 张增德, 周颖. 叠层厚橡胶支座竖向压缩与拉伸力学性能研究 [J]. 工程力学, 2024, 41(12): 167-175.
ZHANG Zengde, ZHOU Ying. Study on compressive and tensile behaviors of thick rubber bearings[J]. Engineering Mechanics, 2024, 41(12): 167-175(in Chinese).

[18] 张增德, 温玉君, 周颖, 等. 叠层厚橡胶支座力学性能及其震振双控性能分析 [J]. 结构工程师, 2024, 40(1): 81-88.
ZHANG Zengde, WEN Yujun, ZHOU Ying, et al. Mechanical properties of thick rubber bearing and its earthquake and subway-induced vibration control analysis[J]. Structural Engineers, 2024, 40(1): 81-88(in Chinese).

[19] 中国国家标准化管理委员会. 钢及钢产品 力学性能试验取样位置及试样制备: GB/T 2975—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
Standardization Administration of the People's Republic of China. Steel and steel products—Location and preparation of samples and test pieces for mechanical testing: GB/T 2975—2018[S]. Beijing: Standards Press of China, 2018(in Chinese).

[20] 中国国家标准化管理委员会. 金属材料 拉伸试验: 第 1 部分: 室温试验方法: GB/T 228.1—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
Standardization Administration of the People's Republic of China. Metallic materials—Tensile testing—Part 1: Method of test at room temperature: GB/T 228.1—2021[S]. Beijing: Standards Press of China, 2021(in Chinese).

[21] 中国国家标准化管理委员会. 硫化橡胶或热塑性橡胶拉伸应力应变性能的测定: GB/T 528—2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
Standardization Administration of the People's Republic of China. Rubber, vulcanized or thermoplastic—Determination of tensile stress-strain properties: GB/T 528—2009[S]. Beijing: Standards Press of China, 2009(in Chinese).

[22] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震试验规程: JGJ/T 101—2015[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Specification for seismic test of buildings: JGJ/T 101—2015[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015(in Chinese).

[23] 国家技术监督局. 胶黏剂 主要破坏类型的表示法: GB/T 16997—1997[S]. 北京: 中国标准出版社, 1997.
The State Bureau of Quality and Technical Supervision. Adhesives—Designation of main failure patterns: GB/T 16997—1997[S]. Beijing: Standards Press of China, 1997(in Chinese).

[24] 方庆红, 宋博, 高雨, 等. 纳米石墨/天然橡胶复合材料的应力软化与动态性能 [J]. 复合材料学报, 2014, 31(6): 1446-1451.
FANG Qinghong, SONG Bo, GAO Yu, et al. Stress softening and dynamic properties of nano-graphite/natural rubber composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2014, 31(6): 1446-1451(in Chinese).

[25] 伍凯, 陈峰, 徐方媛, 等. 型钢与钢纤维混凝土界面黏结性能及损伤耗能试验研究 [J]. 土木工程学报, 2019, 52(3): 1-11, 19.
WU Kai, CHEN Feng, XU Fangyuan, et al. Experimental study on interfacial bonding property and energy dissipation capacity between shape steel and steel fiber reinforced concrete[J]. China Civil Engineering Journal, 2019, 52(3): 1-11, 19(in Chinese).

[26] 王威, 续鉴, 李昱, 等. 带栓钉波形腹板 PEC 柱界面黏结滑移性能与抗剪承载力试验研究 [J/OL]. 工程力学, 2024: 1-13 [2025-03-21]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2595.O3.20230913.1928.059.html>.
WANG Wei, XU Jian, LI Yu. Experimental study on interface bond-slip properties and shear bearing capacity of corrugated webs PEC columns with stud[J/OL]. Engineering Mechanics, 2024: 1-13 [2025-03-21]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2595.O3.20230913.1928.059.html>(in Chinese).

[27] SHARMA S K, ALI M S M, GOLDAR D, et al. Plate-concrete interfacial bond strength of FRP and metallic plated concrete specimens[J]. Composites Part B: Engineering, 2006, 37(1): 54-63.