

新型扇形复合黏弹性阻尼器设计及数值分析

宋江良¹, 牟志奇¹, 李培振^{2*}, 孙杰¹, 高攀¹, 刘润杰¹, 唐晓成¹

(1. 吉林建筑大学 土木工程学院, 长春 130118; 2. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

摘要: 为提高框架结构梁柱节点处的抗震性能, 提出了一种适用于梁柱节点的新型扇形复合黏弹性阻尼器(sector composite viscoelastic damper, SCVD)。采用数值分析手段, 研究了芯材材质(铅、LY100、LY160)、耗能棒数量、耗能棒直径、扇形钢板剪切位移角度、扇形钢板半径比等参数对SCVD耗能性能与阻尼特性的影响; 并就有控和无控状态下的部分包覆钢-混凝土组合(partially encased composite structures of steel and concrete, 简称PEC)框架开展滞回性能分析, 探究了SCVD对PEC框架的减震效果。结果表明: SCVD的耗能效果与芯材屈服强度、耗能棒直径成正比, 与耗能棒数量、剪切位移角度成负相关; 采用SCVD加固后的PEC框架, 其承载力与变形能力得到显著提升; 发生地震作用后, 梁柱构件可基本保持完好, 仅需更换SCVD即可恢复结构使用功能。SCVD的力学模型可采用双线性模型表征, 计算结果与数值模拟结果吻合良好。

关键词: 扇形复合黏弹性阻尼器; 力学性能; 耗能机理; 力学模型; 减震分析

中图分类号: TU352.1

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2026)09-0001-14

DOI: 10.13969/j.jzgjz.20250219003

Design and Numerical Analysis of a Novel Sector Composite Viscoelastic Damper

SONG Jiangliang¹, MU Zhiqi¹, LI Peizhen^{2*}, SUN Jie¹, GAO Pan¹,
LIU Runjie¹, TANG Xiaocheng¹

(1. School of Civil Engineering, Jilin Jianzhu University, Changchun 130118, China;

2. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

*Corresponding author: lipeizh@tongji.edu.cn

Abstract: In order to improve the seismic performance of beam-column joints in frame structures, a novel sector composite viscoelastic damper (SCVD) is proposed for beam-column joints. The effects of core material (lead, LY100, and LY160), number and diameter of energy-dissipating rods, shear displacement angle of sector steel plate and radius ratio of sector steel plate on energy dissipation performance and damping characteristics of SCVD were investigated using numerical analysis. The hysteretic performance of partially encased composite (PEC) frames under controlled and non-controlled conditions was analyzed to evaluate the damping effect of SCVD on PEC frames. The results show that the energy dissipation capacity of SCVD is directly proportional to the core yield strength and the diameter of energy-dissipating rods, and inversely proportional to the number of energy-dissipation rods and the shear displacement angle. The bearing capacity and deformation capacity of PEC frame strengthened SCVD are

收稿日期: 2025-02-19

基金项目: 国家自然科学基金(51978524), 吉林省住建厅建设科学技术计划项目(2023-K-25), 吉林省科技厅青年成长科技项目(20240602067RC), 吉林建筑大学博士科研启动项目(86133601)

作者简介:

宋江良(1989—), 男, 博士, 讲师, 主要从事结构减震和可恢复功能方面的研究。E-mail: songjl1020@163.com。

通信作者:

李培振(1975—), 男, 博士, 教授, 主要从事结构抗震方面的研究。E-mail: lipeizh@tongji.edu.cn。

significantly improved. After the earthquake, the beams and columns remain essentially intact, and the structural function can be restored by replacing only the SCVD. The mechanical behavior of SCVD can be described using a bilinear model, and the calculated results are in good agreement with numerical simulation results.

Keywords: sector composite viscoelastic damper (SCVD); mechanical property; energy dissipation mechanism; mechanical model; damping analysis

被动控制^[1-2]是一类无需外部能源输入即可降低结构振动响应的控制技术,依靠结构自身或附加装置耗散、转移振动能量,从而实现对工程结构振动的抑制。阻尼器是被动控制领域极具代表性的元件,具备耗能效果好、造价低廉、构造简单、更换修复便捷等优势,已在工程中得到大量应用。按照耗能机理可将阻尼器划分为速度相关型(黏滞阻尼器^[3]、黏弹性阻尼器^[4]等)与位移相关型(金属阻尼器^[5]、摩擦阻尼器^[6]等)。

地震作用下,框架结构梁柱节点极易发生损伤破坏^[7];节点一旦失效,会造成框架整体受损甚至倒塌,同时会显著增大震后修复难度。针对梁柱节点的震害问题,刘季等^[8]研发了杠杆弹性阻尼器,即在普通黏弹性阻尼器的基础上增设位移放大杠杆,可有效放大阻尼器的位移;徐昕^[9]提出了扇形铅黏弹性阻尼器,即在黏弹性阻尼器内部设置铅芯,有效提升阻尼器耗能水平;田旭^[10]基于软钢材料的力学性能特性,设计了一种用于梁柱节点的新型软钢减震阻尼器,并采用多尺度建模方法探究了该耗能节点的抗震性能及框架地震响应变化规律。

黏弹性阻尼器于1969年首次被应用于纽约世贸中心双塔工程^[11],每座塔楼布置约一万个黏弹性阻尼器,用于抑制风振响应;1982年在美国哥伦比亚中心大厦中布设了260个黏弹性阻尼器^[12],有效改善了该高层建筑在风荷载与地震作用下的振动表现。国内工程应用方面,在上海张江双子塔中采用了黏弹性连梁阻尼器^[15],将其布置于第一、二道桁架所在楼层,可有效削弱风荷载对高层建筑的不利作用;徐赵东等^[13]将56个黏弹性阻尼器应用于西安市某宾馆的抗震加固工程中,结果表明黏弹性阻尼器可显著减小结构的地震响应;将铅黏弹性阻尼器应用于康宁市某干部职工宿舍^[14],在9.5级地震中主体结构保持完好;此外,在海南某小学食堂中采用了复合黏弹性阻尼器^[16],有效降低了结构在地震作用下的动力响应。

综上,黏弹性阻尼器已经获得行业广泛认可与工程应用。已有研究表明,组合不同耗能特性的构件,可有效提升框架结构安全储备;刚度偏大的阻尼器,框架小变形阶段难以充分发挥耗能能力;而速度相关型阻尼器在框架大变形工况下又会出现刚度不足的问题。另外,虽然在梁柱节点处设置黏弹性阻尼器可以减轻节点损伤,但仍存在若干亟待解决的问题:(1)地震作用下节点之间相对转角通常较小,阻尼器难以发挥预期效果;(2)增设

位移放大杠杆会影响建筑外观与正常使用空间;(3)黏弹性材料力学性能易受温度干扰,造成耗能效果衰减,铅芯的屈服强度偏低,难以抵御罕遇地震作用下的损伤;(4)构件安装工序复杂,震后更换不便。

基于上述问题,本文提出了一种新型扇形复合黏弹性阻尼器(sector composite viscoelastic damper, SCVD),主要由黏弹性材料、钢板及金属耗能棒组成。采用有限元分析方法,研究芯材类型、耗能棒数量、半径比值等参数对SCVD力学性能的影响,得到一组耗能表现较优的设计参数;并基于该参数进一步探究SCVD对部分包覆钢-混凝土组合(partially encased composite structures of steel and concrete,简称PEC)框架的减震效果。

1 新型SCVD构造与工作原理

1.1 新型SCVD的构造

新型SCVD由黏弹性材料、薄钢板、内扇形钢板(inner sector plate, ISP)、外扇形钢板(outer sector plate, OSP)、连接板及金属耗能棒组成。橡胶层与薄钢板经高温高压硫化,形成叠层复合弹性体。ISP、OSP与叠层复合弹性体保持同心扇形布置,连接板分别与ISP、OSP焊接相连,构造形式如图1所示。

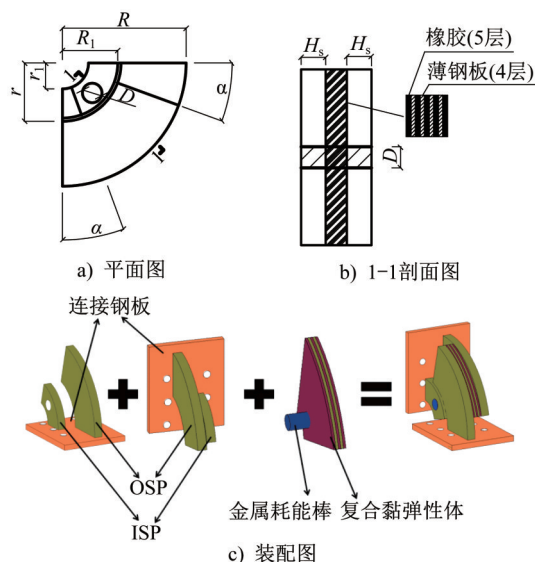


图1 新型SCVD构造图

Fig. 1 Construction diagram of novel SCVD

1.2 新型SCVD的工作原理

传统框架抗震设计为满足“强节点弱构件”理念,一

般通过提高节点刚度实现,但节点刚度增大会约束节点变形,且高刚度节点达到极限承载力后容易发生脆性破坏^[17]。而 SCVD 的设置,既能够保障节点刚度满足抗震设计要求,还可为结构提供附加阻尼,有效防止节点破坏。

SCVD 在框架结构中的工作原理如图 2 所示;地震作用下,框架结构会产生侧移,带动梁柱节点发生相对转动;与框架结构相连的连接钢板会驱动 SCVD 两侧的 ISP 与 OSP 发生相对转动,进而使叠层复合黏弹性体与金属耗能棒产生剪切滞回变形,耗散地震输入能量。连接板刚度远高于其余构件刚度,保证阻尼器耗能阶段连接部位不会发生破坏。因此设置 SCVD 既可以在一定程度上抑制框架层间侧移,还能够避免框架层间位移角在地震作用下超限。

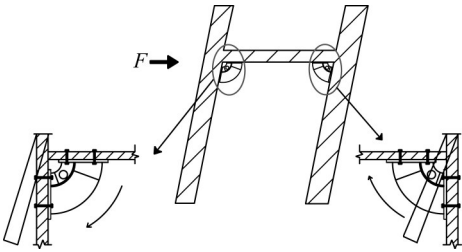


图 2 新型 SCVD 工作原理图

Fig. 2 Working principle diagram of novel SCVD

表 1 SCVD 尺寸

Table1 SCVD dimensions

元件	扇形钢板厚度 H_s/mm	芯材直径 D/mm	OSP 外径 R/mm	OSP 内径 r/mm	ISP 外径 R_1/mm	ISP 内径 r_1/mm	剪切位移角度 $\alpha/(\text{^\circ})$	耗能棒 数量/个	半径比 ω
SCVD	30	40	300	150	140	70	15	1	0.5

注: $\omega=(r_1+R_1)/(r+R)$

2.2 材料本构

ISP、OSP 及薄钢板均采用 Q235 钢,连接板采用 Q355 钢;钢材本构选用双线性随动强化模型。黏弹性材料选取天然橡胶,其力学模型采用 Mooney-Rivlin 模型,力学性能的 5 个常数由橡胶材性试验数据拟合得到^[9]。钢材、橡胶的本构参数如表 2、3 所示。

表 2 钢材本构性能参数

Table2 Constitutive property parameters of steel

钢材牌号	E/MPa	E'/MPa	ν	f_y/MPa
Q235	217 000	482 7	0.3	235
Q355	206 000	412 0		355

注: E 为弹性模量; E' 为强化阶段模量; ν 为泊松比; f_y 为屈服强度。

2.3 接触定义

ISP、OSP 与叠层复合弹性体之间采用 Tie 接触;金

1.3 新型 SCVD 的优点

该新型 SCVD 主要具备如下特点:(1) 阻尼元件原材料(钢板、橡胶、金属)易获取,整体构造简单,工程造价低;(2) 采用金属耗能棒与黏弹性材料两类元件协同剪切变形耗能,耗能性能稳定;(3) 实现分阶段耗能,小转角变形阶段依靠 OSP 驱动复合黏弹性体发生剪切变形耗能,大转角变形阶段,ISP 同时驱动复合黏弹性体与金属耗能棒共同剪切耗能;转角达到阈值之后,ISP、OSP 还可为节点提供额外抗弯能力;(4) 通过螺栓与建筑结构连接,便于生产与安装,震后可快速完成更换;(5) 可放大节点位置的较小相对位移,减小空间占用。

2 新型 SCVD 有限元模型

2.1 有限元模型建立

为研究芯材类型、金属耗能棒数量等参数对 SCVD 力学性能的影响,本文采用 ABAQUS 有限元软件开展仿真分析。在施加荷载时,连接板仅起到安装作用,不参与耗能,建模过程中予以省略以简化计算。

按照表 1 几何尺寸建立构件草图,采用拉伸(Extrusion)命令完成阻尼器各部件三维建模;连接板、ISP、OSP、金属耗能棒、薄钢板采用 8 节点六面体减缩积分(C3D8R)单元模拟;黏弹性材料采用 8 节点六面体减缩杂交(C3D8RH)单元模拟。

表 3 橡胶 Mooney-Rivlin 本构性能常数

Table3 Mooney-Rivlin constitutive property constant of rubber

C_{10}	C_{01}	C_{20}	C_{30}	C_{11}
2.06×10^{-1}	1.86×10^{-3}	4.01×10^{-3}	2.81×10^{-3}	1.01×10^{-3}

注:常数 C_{10} 与 C_{01} 用于描述橡胶的基本非线性变形特性;常数 C_{20} 、 C_{30} 与 C_{11} 用于进一步提高模型对大变形阶段的拟合能力。

属耗能棒与叠层复合弹性体间的接触面,法向设置为硬接触,切向采用库仑摩擦,摩擦系数为 0.5,同时面-面接触滑移模式选用小滑移。

2.4 边界条件及加载制度

在有限元模型的水平端施加固定约束;在 OSP、ISP 的几何中心建立参考点并设定耦合约束,对耦合点施加 20%、40%、60%、80%、100% 的往复荷载,约束加载点除

加载方向外的全部自由度,加载制度如表4所示;构件网格划分见图3。

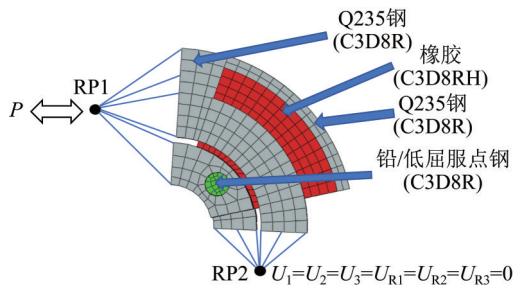


图3 新型SCVD网格划分

Fig. 3 Mesh division of novel SCVD

3 SCVD的参数分析

为研究芯材、耗能棒直径 D 、耗能棒数量、剪切位移

表4 加载制度

Table 4 Loading system

工况	剪应变 $\gamma/\%$	角位移 θ/rad	加载频率 f/Hz	循环 次数/次
1	20	0.06		
2	40	0.12		
3	60	0.18	0.2	1
4	80	0.24		
5	100	0.30		

注: $\theta = \arctan(\gamma/300)$ 。

角度 α 及钢板半径比 ω 对SCVD力学性能的影响,建立了12组有限元模型开展对比分析,各组阻尼器的具体参数如表5所示。

表5 各阻尼器参数对比

Table 5 Parameters comparison of dampers

阻尼器编号	扇形钢板 厚度 H_s/mm	芯材直径 D/mm	OSP 外径 R/mm	OSP 内径 r/mm	ISP 外径 R_1/mm	ISP 内径 r_1/mm	剪切位移 角度 $\alpha/^\circ$	耗能棒 数量/个	半径比 ω	芯材材质
SLVD		40		150	140		15	4	0.5	铅
LYSVD-100		40		150	140		15	4	0.5	LY100
LYSVD-160		40		150	140		15	4	0.5	LY160
SCVD-1		40		150	140		15	1	0.5	LY160
SCVD-2		40		150	140		15	2	0.5	LY160
SCVD-3	30	40	300	150	140	70	15	3	0.5	LY160
SCVD-4		30		150	140		15	1	0.5	LY160
SCVD-5		50		150	140		15	1	0.5	LY160
SCVD-6		40		150	140		10	1	0.5	LY160
SCVD-7		40		150	140		20	1	0.5	LY160
SCVD-8		40		160	130		15	1	0.4	LY160
SCVD-9		40		130	160		15	1	0.6	LY160

为减小其余参数带来的影响,在变参分析时采用控制变量法保持钢板厚度 H_s 、OSP 外径 R 、ISP 内径 r_1 不变。表5中SLVD(sector lead viscoelastic damper)为扇形铅黏弹性阻尼器,即金属耗能棒的材质为铅;LYSVD(low yield sector steel viscoelastic damper)为扇形低屈服点钢黏弹性阻尼器,LYSVD-100与LYSVD-160分别采用屈服强度为100 MPa、160 MPa的LY100、LY160作为耗能棒材料。

3.1 芯材

为研究不同芯材对SCVD力学性能的影响,建立了3个有限元模型(SLVD、LYSVD-100、LYSVD-160),参

数如表5所示;SLVD、LYSVD-100、LYSVD-160除金属耗能棒材质不同,其余几何参数完全一致。铅、低屈服点钢的本构参数分别如表6、7所示^[18]。

表6 铅的本构性能参数

Table 6 Constitutive property parameters of lead

材料	E/MPa	E'/MPa	ν	f_y/MPa
铅	16 460	0	0.42	10.5

SLVD、LYSVD-100、LYSVD-160的滞回曲线与骨架曲线如图4a)、b)所示。随着芯材屈服强度提高,阻尼器的屈服弯矩逐渐增大;受拉工况下SLVD、

表7 低屈服点钢的本构性能参数

Table 7 Constitutive property parameters of low yield point steel

材料	E/MPa	ν	f_y/MPa	f_u/MPa	ϵ_u
LY100	199 000	0.3	128	252	0.270 2
LY160	194 000		186	294	0.241 6

LYSVD-100和LYSVD-160的屈服弯矩数值接近;受压

工况下,相较于SLVD,LYSVD-100和LYSVD-160的屈服弯矩分别提高了18%、18.9%。三者的等效黏滞阻尼比与单周耗能曲线如图4c)、d)所示,SLVD的最大等效黏滞阻尼比为0.18;LYSVD-100和LYSVD-160的最大等效黏滞阻尼比分别为0.32、0.31;随角位移增大,阻尼器的耗能持续增大。对比SLVD,LYSVD-100、LYSVD-160的耗能分别提高了70.7%、73.2%。

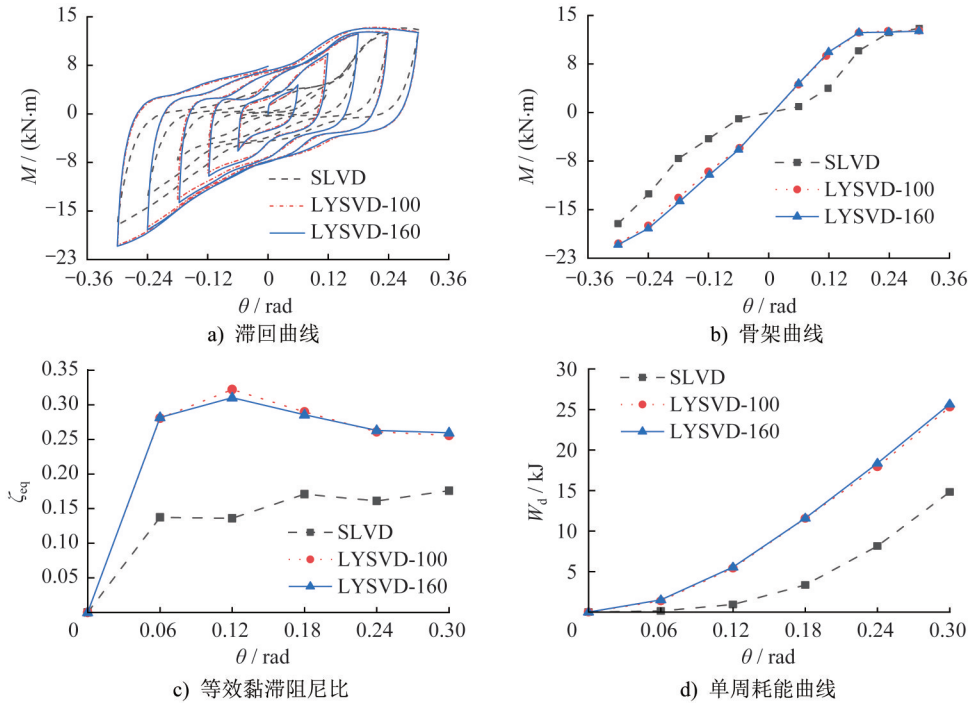


图4 不同芯材新型SCVD力学性能对比

Fig. 4 Comparison of mechanical properties of novel SCVD with different core materials

综上,耗能棒材质对SCVD力学性能影响显著。采用低屈服点钢作为耗能棒,阻尼器的滞回环饱满对称,近似于平行四边形,且阻尼器的屈服弯矩与耗能逐渐增大。对于LYSVD-100和LYSVD-160,由于LY160的屈服强度更高,LYSVD-160展现的耗能能力更优,力学性能更稳定。

3.2 耗能棒数量

为研究不同耗能棒数量对阻尼器力学性能的影响,建立了4个新型SCVD的有限元模型(LYSVD-160、SCVD-1~SCVD-3),参数如表5所示。LYSVD-160、SCVD-1~SCVD-3仅LY160耗能棒数量不同,其余参数保持一致。

LYSVD-160、SCVD-1~SCVD-3的滞回曲线与骨架曲线如图5a)、b)所示,其滞回曲线与骨架曲线形态与变化趋势接近。相较于SCVD-2、SCVD-3,SCVD-1、LYSVD-160的耗能表现更优。SCVD-1的耗

能优于LYSVD-160的耗能,其屈服弯矩较LYSVD-160屈服弯矩提高了1%,说明外侧扇形布置多根耗能棒会约束复合黏弹性体剪切变形,削弱耗能效果。SCVD-1~SCVD-3、LYSVD-160的等效黏滞阻尼比与单周耗能曲线如图5c)、d)所示。SCVD-1、SCVD-2、SCVD-3的等效黏滞阻尼比最大值分别为0.32、0.33、0.32;随着耗能棒数量的增多,阻尼器的耗能也逐渐增大,依次增大了3%、3.6%、4.1%。

3.3 耗能棒直径

为研究耗能棒直径对阻尼器力学性能的影响,建立了3个新型SCVD的有限元模型(SCVD-1、SCVD-4、SCVD-5),参数如表5所示。SCVD-1、SCVD-4、SCVD-5除芯材直径不同,其余参数尺寸均相同。

SCVD-1、SCVD-4、SCVD-5的滞回曲线与骨架曲线如图6a)、b)所示,随金属耗能棒直径的增大,屈服弯矩有所提高,耗能能力逐渐增强。对比SCVD-1、SCVD-4,

SCVD-5屈服弯矩分别提升了8%、2%；SCVD-1、SCVD-4和SCVD-5的等效黏滞阻尼比与单周耗能曲线如图6c)、d)所示,在20%~100%的应变幅值下,SCVD-4、

SCVD-5的等效黏滞阻尼比最大值分别为0.29、0.35；随位移幅值增大,耗能能力持续增长；SCVD-1与SCVD-5单周耗能差异仅为0.5%~1%。

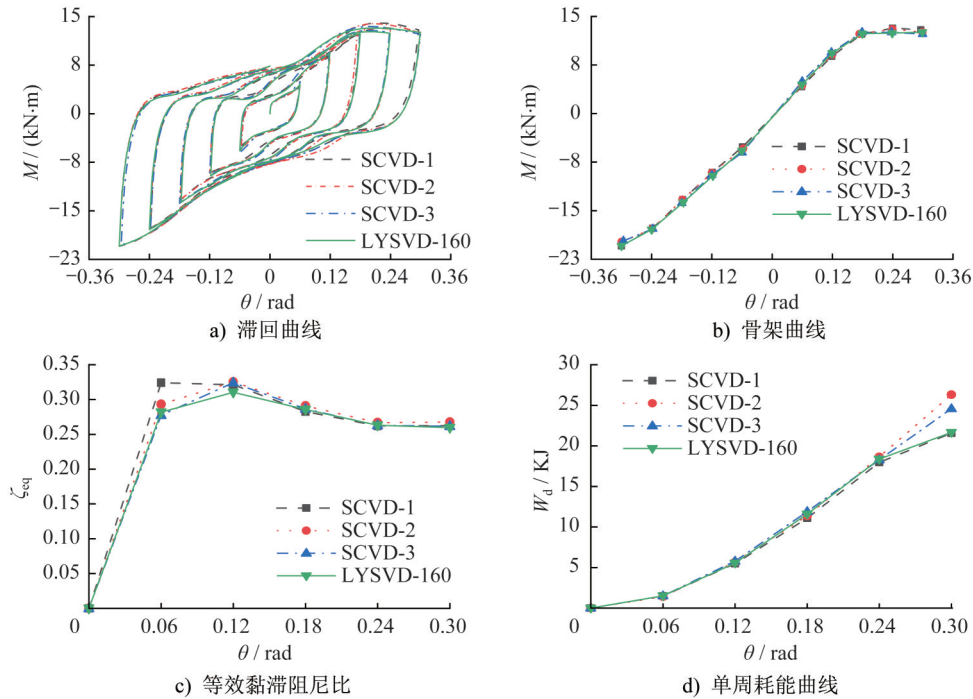


图5 不同数量耗能棒新型SCVD力学性能对比

Fig. 5 Comparison of mechanical properties of novel SCVD with different number of energy dissipation rods

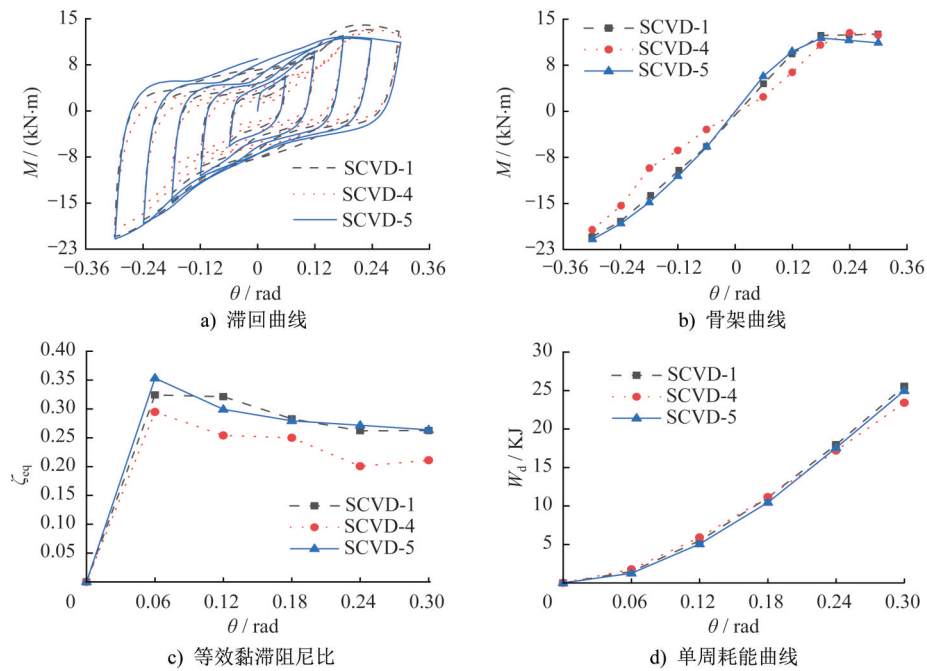


图6 不同耗能棒直径新型SCVD力学性能对比

Fig. 6 Comparison of mechanical properties of novel SCVD with different energy dissipation rod diameters

综上,耗能棒直径对SCVD力学性能影响较小;同等转角位移下,直径越大,滞回环面积越大,耗能效果越好。但工程中,将直径为50 mm的金属耗能棒焊接在厚度为30 mm的扇形钢板上施工难度大,无法保证金属耗能棒

工作可靠性;SCVD-5相对SCVD-1耗能仅提升了1.1%,综合材料消耗与施工可行性,推荐选用直径为40 mm的LY160耗能棒。

3.4 剪切位移角度

为研究扇形钢板不同剪切位移角度对阻尼器力学性能的影响,建立了3个新型SCVD的有限元模型(SCVD-1、SCVD-6和SCVD-7),参数如表5所示。SCVD-1、SCVD-6、SCVD-7除剪切位移角度 α 不同,其余参数尺寸均相同。

SCVD-1、SCVD-6、SCVD-7的滞回曲线和骨架曲

线如图7a)、b)所示。剪切位移角度增大会减小扇形钢板与复合黏弹性体的有效接触面积,不利于剪切耗能。SCVD-1、SCVD-6、SCVD-7的等效黏滞阻尼比与单周耗能曲线如图7c)、d)所示,SCVD-6、SCVD-7的等效黏滞阻尼比最大值分别为0.34、0.35;加载至0.3 rad后,SCVD-6的耗能为25.19 kJ,SCVD-7的耗能为25.56 kJ。

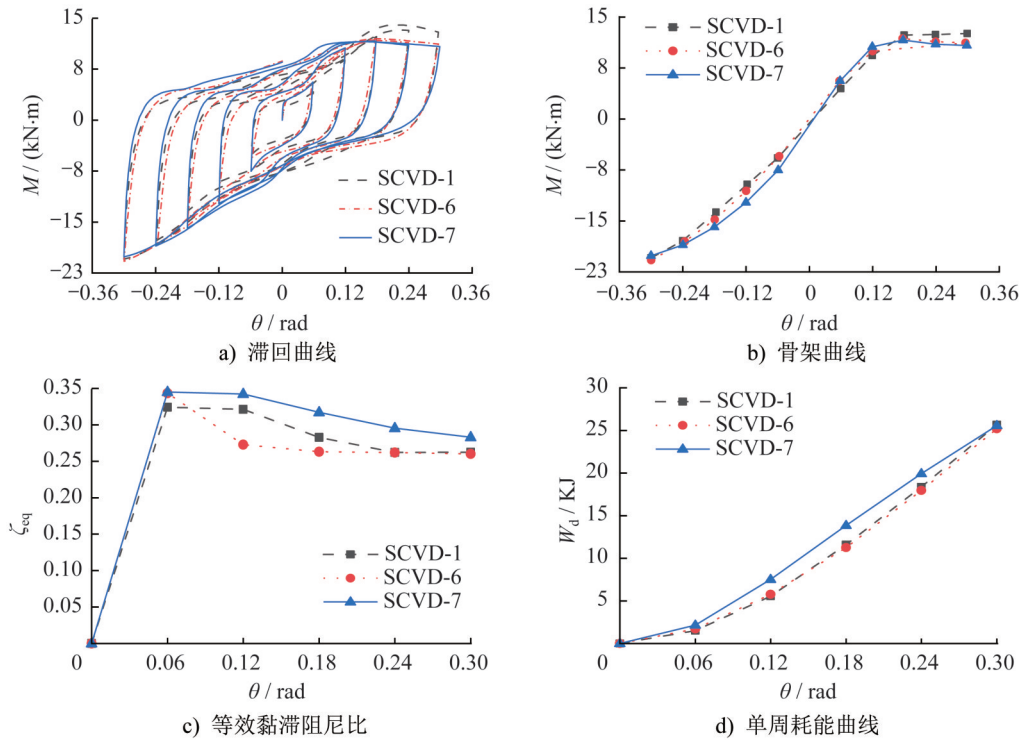


图7 不同剪切位移角度新型SCVD力学性能对比

Fig. 7 Comparison of mechanical properties of novel SCVD with different shear displacement angles

综上所述,剪切位移角度对SCVD的滞回耗能影响较小;随着剪切位移角度的增大,SCVD的屈服弯矩逐渐减小,但总耗能水平基本相当。这是由于本文在设计SCVD时没有将ISP、OSP设置为刚体,为了更接近构件实际工作状态,ISP与OSP也会参与部分耗能;当剪切位移角度增大时,ISP、OSP进入耗能阶段工作阶段的时间有所推迟,造成屈服弯矩下降。

3.5 扇形钢板半径比

为研究扇形钢板半径比对阻尼器力学性能的影响,建立了3个新型SCVD的有限元模型(SCVD-1、SCVD-8、SCVD-9),参数如表5所示。SCVD-1、SCVD-8、SCVD-9除扇形钢板半径比 ω 不同,其余参数尺寸均相同。

SCVD-1、SCVD-8、SCVD-9的滞回曲线和骨架曲线如图8a)、b)所示。SCVD-1的屈服弯矩相较于SCVD-8的屈服弯矩下降了17.2%,较SCVD-9的屈服弯矩下降了10.2%;SCVD-1、SCVD-8、SCVD-9的等效黏滞阻尼

比与单周耗能曲线如图8c)、d)所示。SCVD-8、SCVD-9的等效黏滞阻尼比最大值分别为0.386、0.335;SCVD-8的耗能为23.41 kJ,SCVD-9的耗能为24.96 kJ。

综上所述,扇形钢板半径并非越大越好;在SCVD的总几何尺寸保持不变的前提下, ω 取0.5左右时阻尼器的耗能表现最优,即扇形钢板外径为内径2倍。这是由于本文在设计SCVD时,为控制半径变量数目将 r_1 与 R 设为定值;而当SCVD发生变形时,ISP与OSP共同参与耗能,当扇形钢板的外径为内径2倍时,二者有效工作半径匹配,整体耗能效果最佳。

3.6 累积耗能

滞回环包围面积代表构件单次循环耗散的能量,把各加载幅值下的耗能累加,即可得到构件累积耗能。不同参数SCVD的累积耗能玫瑰图见图9,径向代表耗能大小,不同颜色对应不同加载幅值。由图9可知,SLVD整体耗能能力偏弱,铅芯屈服强度低,地震作用下容易较

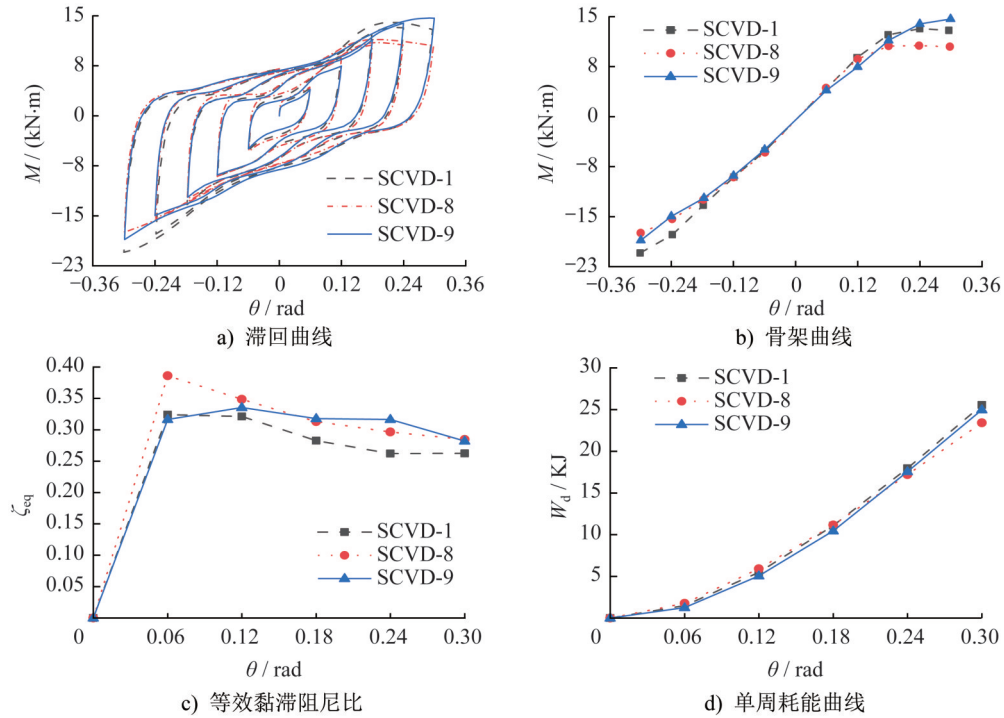


图8 不同半径比新型SCVD力学性能对比

Fig. 8 Comparison of mechanical properties of novel SCVD with different radius

早发生断裂;SCVD-7 累积耗能能力较强,较大剪切位移角度对总耗能发挥有利作用。

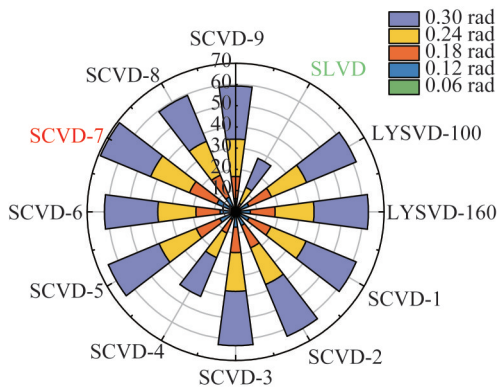


图9 新型SCVD累积耗能玫瑰图

Fig. 9 Cumulative energy dissipation diagram of novel SCVD

3.7 与现有扇形黏弹性阻尼器对比

参考徐昕^[9]的模型参数建立扇形铅黏弹性阻尼器 SLVD-L (sector lead viscoelastic damper, SLVD-L), 采用表4加载制度, 与本文 SCVD-1 开展对比, 滞回曲线见图10。可以看出 SCVD-1 滞回环包围面积显著大于 SLVD-L 滞回环包围面积, 这是因为低屈服点钢的屈服强度远大于铅的屈服强度; 且由于 ISP 的设置, 使得 SCVD 在小变形位移下就可以高效耗能, 弥补了传统节点阻尼器小变形下耗能不足的缺陷。

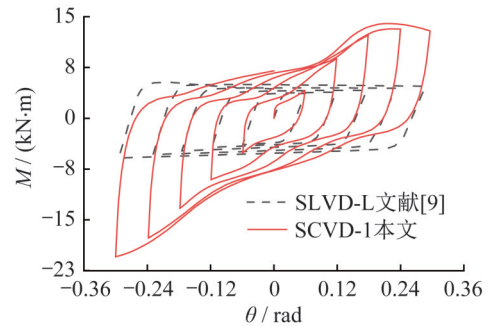


图10 两种阻尼器滞回曲线对比

Fig. 10 Comparison of hysteretic curves of two dampers

4 SCVD加固框架抗震性能分析

4.1 PEC框架有限元建模

基于上述 SCVD 的设计原则及假定, 选用 SCVD-1 开展 SCVD 加固 PEC 框架的抗震性能研究。

参考路瑶^[19]完成的 PEC^[20-21]梁柱节点拟静力试验, 并结合文献[19]中相关试件信息, 采用 ABAQUS 有限元软件建立单层单跨 PEC 框架有限元模型, 如图11所示。模型中混凝土、H型钢柱、H型钢梁和端板均采用8节点六面体减缩积分(C3D8R)单元模拟。混凝土采用弹塑性损伤本构, 相关参数如表6所示; 钢材采用 Q355, 本构参数见表2, 加载制度见图12。混凝土柱与 H 型钢柱接触面采用库仑摩擦接触, 切向允许黏结滑移, 法向采用硬接触, 摩擦系数取 0.5; 为更接近真实地震作用下框架的受

力,在框架柱顶施加 500 kN 轴压力,同时施加水平侧向位移。

表 6 混凝土本构性能参数

Table 6 Constitutive property parameters of concrete

E_c/MPa	ν	$\psi/(^{\circ})$	e	f_{b0}/f_{c0}	K	μ
35 183	0.2	40	0.1	1.225	2/3	0.000 5

注: E_c 为混凝土弹性模量; ν 为泊松比; ψ 为膨胀角; e 为流动偏角; f_{b0}/f_{c0} 为双轴极限抗压强度与单轴抗压强度之比; K 为拉伸子午面与压缩子午面上第二应力不变量之比; μ 为黏性系数。

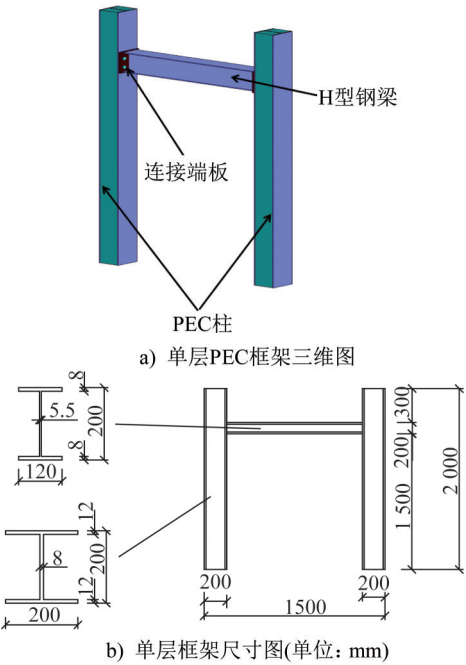


图 11 单层 PEC 框架

Fig. 11 Single-story PEC frame

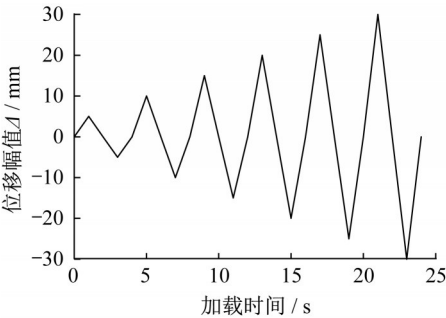


图 12 PEC 框架加载制度

Fig. 12 PEC frame loading system

4.2 无控 PEC 框架抗震性能分析

无控 PEC 柱-H 型钢梁在水平往复荷载下的 Mises 应力云图见图 13a),混凝土受压损伤分布见图 13b)。应

力集中主要发生在 H 型钢梁端位置,梁端出现明显屈曲变形,节点区域产生裂缝。有限元模拟得到的损伤分布和文献[19]试验现象基本吻合,验证了该有限元模型的合理性。

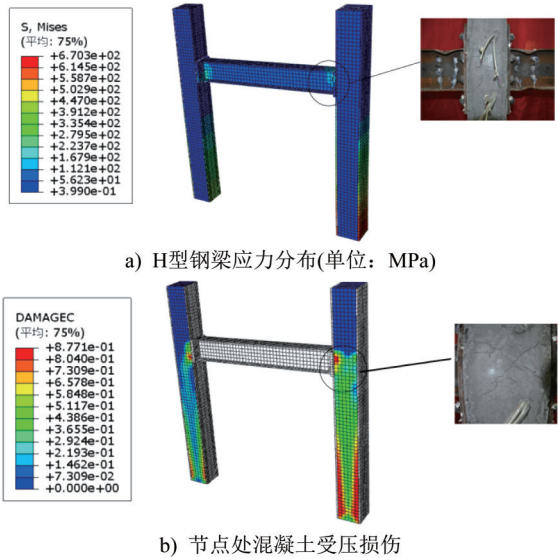


图 13 无控状态下 PEC 柱-H 型钢梁破坏模拟图

Fig. 13 Simulation diagram of PEC column-H-shaped steel beam failure under uncontrolled state

无控 PEC 框架在水平地震荷载作用下的 H 型钢梁应力云图如图 14a)所示,混凝土受压、受拉损伤分布分别如图 14b)、c)所示。对比图 13 可以发现,PEC 框架梁端应力水平有所降低;但节点核心区混凝土损伤依然比较严重。

4.3 有控 PEC 框架抗震性能分析

针对有控 PEC 框架,孙飞飞等^[22]的研究表明:转动型阻尼器的节点转动变形大多集中于阻尼器本体,容易引起楼板较大变形,楼板构件会约束阻尼器变形耗能;因此转动型阻尼器宜布置在框架梁下翼缘位置。

参考该安装方式,将 SCVD-1 布置于前述 PEC 框架梁柱节点位置,构件布置见图 15,阻尼器参数见表 5。在有控 PEC 框架柱顶处施加水平侧向位移,有控 PEC 框架应力结果如图 16a)所示;对比无控框架(图 14a))可以看出,在相同地震作用下 SCVD 承担大部分内力,耗散大量输入能量,有效减小 PEC 框架节点处的应力集中,减少节点部位能量累积。SCVD-1 的应力分布如图 16b)所示,可看出 SCVD-1 依靠弯剪协同变形耗散地震能量,将梁柱塑性损伤外移,实现韧性节点的设计目标。有控 PEC 框架混凝土受压、受拉损伤如图 16c)、d)所示,对比无控结果可见,SCVD-1 能够显著减轻节点核心区混凝土损伤,有效保护节点。

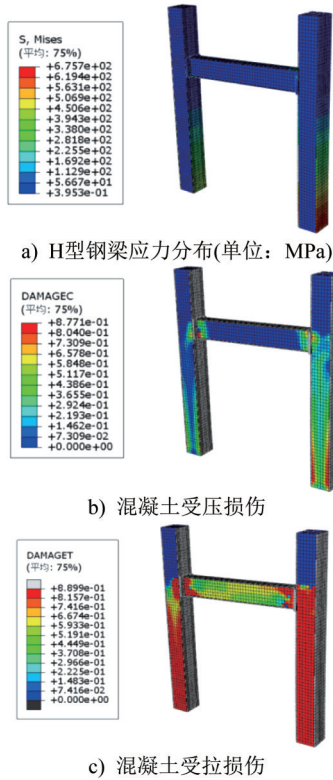


图 14 无控状态下PEC框架应力分布与损伤

Fig. 14 Stress distribution and damage of PEC frame under uncontrolled state

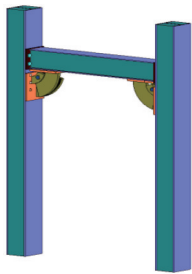


图 15 新型 SCVD 在 PEC 框架结构中的布置

Fig. 15 Arrangement of novel SCVD in PEC frame structure

4.5 力学性能对比

建立三组框架模型 M0(PEC 柱-H 型钢梁基准模型)、M1(无控 PEC 框架)、M2(增设 SCVD-1 的 PEC 框架),其骨架曲线与累积耗能曲线见图 17。从模型 M0 与 M1 的对比可知,由于 H 型钢梁中填充了混凝土,使得框架结构在受压时的最大阻尼力增大了 6%,受拉时最大阻尼力增大了 4%,耗能提升了 57.5%;从模型 M1 与 M2 的对比可知,增设 SCVD 之后,受压工况下框架结构最大阻尼力增大了 12.6%,受拉工况下最大阻尼力增大了 8.4%,耗能提升了 147.6%。结果表明 SCVD 用于 PEC 框架加固具备可行性,对框架抗震性能提升效果显著。

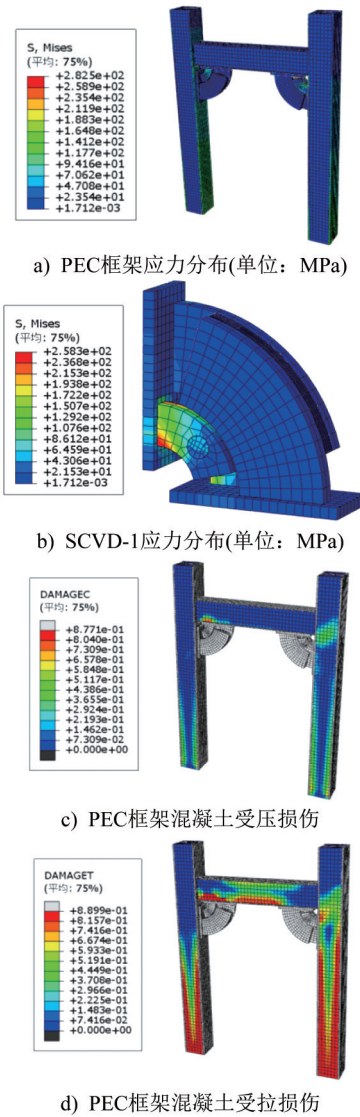


图 16 有控状态下 PEC 框架应力分布与损伤

Fig. 16 Stress distribution and damage of PEC frame under controlled state

5 SCVD 力学模型

5.1 SCVD 承载力公式

可在 Kelvin 模型基础上并联 LY 模型得到 SCVD 力学模型,即双线性模型^[23],如图 18 所示。SCVD 通过低屈服点钢与复合黏弹性体实现协同耗能,承载力计算公式见式(1):

$$F_{SCVD} = F_{LYZ} + F_{RZ} \quad (1)$$

式中: F_{SCVD} 为 SCVD 承载力; F_{LYZ} 为低屈服点钢提供的力; F_{RZ} 为橡胶提供的力。

ISP 与 OSP 的位移存在一定几何关系,如图 19 所示,二者位移可由一近似三角形表示,计算公式见式(2)、(3):

$$\frac{(R_1 + r_1)/2}{\Delta} = \frac{(R + r)/2}{\Delta_e} \quad (2)$$

则有:

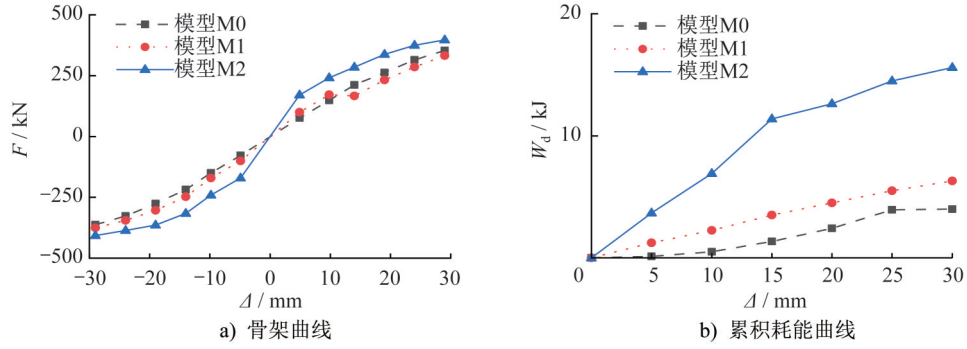


图 17 三种框架模型的力学性能对比

Fig. 17 Comparison of mechanical properties of three frame models

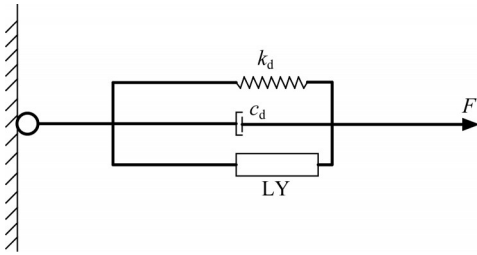


图 18 新型 SCVD 力学模型

Fig. 18 Mechanical model of novel SCVD

$$\Delta = \Delta_e \omega \quad (3)$$

式中: ω 为 ISP 与 OSP 内、外半径之和之比; Δ 为 ISP 钢板之间的相对位移; Δ_e 为 OSP 的剪切位移。

低屈服点钢棒的剪切变形如图 20 所示, 对于 ISP 由能量守恒可知, 在不考虑黏弹性体时, 外力做功等于低屈服点钢的剪切耗能, 计算公式见式(4)~(6):

$$W_F = W_{LY} \quad (4)$$

$$W = \int F d\Delta = F\Delta \quad (5)$$

$$W_{LY} = \int_V \left(\int_0^\gamma \tau d\gamma \right) dV = A_S h \int_0^\gamma \tau d\gamma \quad (6)$$

式中: F 为外力, 由牛顿第二定律可知 $F = F_{LY}$; A_S 为低屈服点钢棒的横截面积; V 为低屈服点钢棒的体积; γ 为变形量; τ 为低屈服点钢棒的剪应力; h 为低屈服点钢棒的有效剪切长度。

由剪切胡克定律可知, 在低屈服点钢未屈服时有:

$$\tau = G_{LY} \gamma \quad (7)$$

式中: G_{LY} 为低屈服点钢的剪切模量。将式(7)代入式(6)可得:

$$W_{LY} = A_S h G_{LY} \int_0^\gamma \gamma d\gamma = A_S h G_{LY} \cdot \frac{1}{2} \gamma^2 \quad (8)$$

在变形转角极小时, γ 可近似等于 $\tan \gamma$, 即:

$$\gamma = \tan \gamma = \frac{\Delta}{h} \quad (9)$$

将式(9)代入式(8)可得:

$$W_{LY} = A_S G_{LY} \frac{\Delta^2}{2h} \quad (10)$$

将式(5)和式(10)代入式(4)可得:

$$F_{LY} = A_S G_{LY} \frac{\Delta}{2h} \quad (11)$$

由于低屈服点钢棒在剪切钢板区段内不会产生塑性变形, 则有:

$$h = H - 2H_s \quad (12)$$

式中: H 为低屈服点钢棒总长度; H_s 为扇形钢板厚度。将式(12)代入式(11)可得出 SCVD 未屈服时的承载力公式, 计算公式见式(13):

$$F_{LY} = A_S G_{LY} \frac{\Delta}{2(H - 2H_s)} = G_{LY} \frac{\Delta}{H - 2H_s} \cdot \frac{\pi}{8} D^2 \quad (13)$$

式中: D 为低屈服点钢棒的直径。

对于 OSP 同理可得:

$$F'_{LY} = G_{LY} \frac{\Delta}{(H - 2H_s)\omega} \cdot \frac{\pi}{8} D^2 (n - 1) \quad (14)$$

式中: n 为耗能棒数量。

则可得出耗能棒提供的力为:

$$F_{LYZ} = F_{LY} + F'_{LY} = G_{LY} \cdot \frac{\pi}{8} D^2 \frac{\Delta}{(H - 2H_s)} \cdot \left(\frac{n-1}{\omega} + 1 \right) \quad (15)$$

当钢棒在低屈服点屈服时, 由材料力学可知:

$$F_y = \tau_y A_S \quad (16)$$

将(16)代入(11)可得出低屈服点钢在 SCVD 中的屈服位移为:

$$\Delta_y = \frac{2\tau_y}{G_{LY}} (H - 2H_s) \quad (17)$$

SCVD 中橡胶提供的力 F_R 由 ISP 与 OSP 共同提供, 为便于分析将扇形部分等效为矩形^[24], 如图 19 矩形虚线框所示; 节点发生转角位移时, ISP 将沿矩形的长度与宽度方向分别产生大小为 F 的分力, 两分力合成得到水平合力 F_e , 计算公式见式(18):

$$F_e = \sqrt{2} F \quad (18)$$

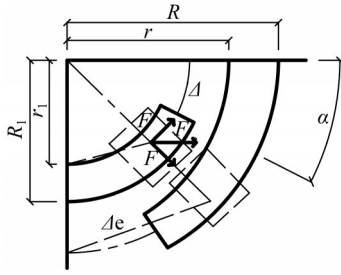


图19 扇形钢板变形示意图

Fig. 19 Deformation diagram of sector plate

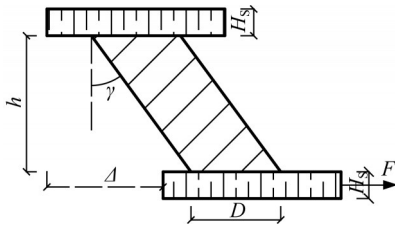


图20 低屈服点钢棒变形示意图

Fig. 20 Deformation diagram of low yield point steel bar

在复合黏弹性阻尼器中,单层黏弹性体受力为^[23]:

$$F' = \beta K_v \Delta \quad (19)$$

式中: β 为考虑不可压缩橡胶受耗能棒、薄钢板以及预压力作用时,产生侧向膨胀效应所引入的硬度修正系数, β 取值见表7^[25]; K_v 为黏弹性材料的剪切刚度, $K_v = 2(C_{01} + C_{10})$,其中 C_{01} 控制材料大应变阶段的应力硬化行为, C_{10} 主导小应变下的弹性响应^[26-27],具体取值见表3; Δ 为ISP的剪切位移。

表7 橡胶硬度修正系数取值

Table7 Rubber stiffness correction coefficient

邵氏硬度(±2)	标准剪切模量 G/MPa	硬度修正系数 β
30	0.30	0.93
35	0.39	0.89
40	0.46	0.85
45	0.54	0.80
50	0.64	0.78
55	0.83	0.73
60	1.08	0.64

叠层黏弹性体承受外力作用时,引入影响系数 ρ ,用以考虑内部薄钢板对黏弹性体的挤压变形效应:

$$F = F' \rho = \rho \beta K_v \Delta \quad (20)$$

将式(20)代入式(18)可得:

$$F_e = \sqrt{2} \beta K_v \Delta \rho \quad (21)$$

影响系数 ρ 可通过对3.4节中剪切位移角度的骨架

曲线线性拟合得出。

对于OSP同理可得:

$$F_{ee} = \sqrt{2} \beta K_v \Delta_e \rho \quad (22)$$

则得出橡胶提供的力为:

$$F_{RZ} = F_e + F_{ee} = \sqrt{2} \beta K_v \Delta_e (1 + \omega) \rho \quad (23)$$

则SCVD的承载力公式为:

弹性阶段($0 \leq \Delta < \Delta_y$):

$$F_{SCVD} = G_{LY} \frac{\Delta}{H - 2H_s} \cdot \frac{\pi}{8} D^2 \left(\frac{n-1}{\omega} + 1 \right) + \sqrt{2} \beta K_v \Delta (1 + \omega) \rho \quad (24)$$

屈服阶段($\Delta_y \leq \Delta \leq \Delta_m$):

$$F_{SCVD} = \tau_y \cdot \frac{\pi}{4} D^2 n + \sqrt{2} \beta K_v \Delta (1 + \omega) \rho \quad (25)$$

5.2 承载力公式验证

选取耗能棒数量作为变量对承载力公式进行验证,验证结果如表8所示。对于LYSVD-160与SCVD-1~SCVD-3,式(25)计算得到的屈服位移、屈服荷载与模拟值误差较小,二者吻合较好。

表8 SCVD承载力计算值与模拟值对比

Table 8 Comparison of SCVD bearing capacity between calculated and simulated results

模型编号	承载力/kN		相对误差 $\delta/\%$
	模拟值 $F_{y,s}$	计算值 $F_{y,c}$	
SCVD-1	419.01	434.31	3.5
SCVD-2	418.16	430.62	2.8
SCVD-3	415.41	429.65	3.4
LYSVD-160	410.15	400.32	-2.4

注: $\delta = [(F_{y,c} - F_{y,s}) \times 100\%]/F_{y,s}$

6 结论

本文采用数值分析方法对SCVD的力学性能开展系统分析,探究设置SCVD后加固框架结构的减震效应,并建立SCVD对应的力学计算模型,主要结论如下:

(1) SCVD为应用于框架梁柱节点部位的复合黏弹性阻尼器,由Q235钢材、黏弹性材料以及LY160组成;地震荷载作用下,阻尼器借助梁柱节点的转动变形实现地震能量耗散。

(2) SCVD的屈服弯矩随耗能棒屈服强度与直径的增大而增大,随着耗能棒数量的增加而减小,剪切位移角增大会导致SCVD屈服弯矩下降;钢板半径比 ω 取0.5左右时,SCVD的耗能性能最优。

(3) 针对PEC框架结构,在H型钢梁内部填充混凝土仅能够小幅提高框架整体承载力,对结构耗能性能的

提升效果并不显著;而在PEC框架中布设SCVD则可将梁柱破坏转移至节点区,且框架结构的承载力与耗能能力均得到大幅改善。

(4) 本文建立的SCVD双线性力学模型计算结果与数值模拟结果吻合较好,该力学模型能够对SCVD的承载能力进行估算,可为后续工程分析提供参考。

参考文献:

- [1] VERBAAN C A M, PETERS G W M, STEINBUCH M. The advantage of linear viscoelastic material behavior in passive damper design-with application in broad-banded resonance dampers for industrial high-precision motion stages[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2017, 386: 242-250. DOI: 10.1016/j.jsv.2016.05.031.
- [2] 吴巧云, 肖诗烨, 朱宏平. 连接Kelvin阻尼器的对称双塔楼结构被动控制研究[J]. *土木工程学报*, 2018, 51(增刊1): 109-115. DOI: 10.15951/j.tmgxcb.2018.s1.018.
- WU Qiaoyun, XIAO Shiye, ZHU Hongping. Passive control research on symmetrical twin tower buildings connected with Kelvin dampers[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2018, 51(Suppl.1): 109-115. DOI: 10.15951/j.tmgxcb.2018.s1.018. (in Chinese)
- [3] LEE D, TAYLOR D P. Viscous damper development and future trends[J]. *The Structural Design of Tall Buildings*, 2001, 10(5): 311-320. DOI: 10.1002/tal.188.
- [4] HU S L, KOETAKA Y, CHEN Z P, et al. Hybrid self-centering braces with NiTi-SMA U-shaped and frequency-dependent viscoelastic dampers for structural and nonstructural damage control[J]. *Engineering Structures*, 2024, 308: 117920. DOI: 10.1016/j.engstruct.2024.117920.
- [5] JAVANMARDI A, IBRAHIM Z, GHAEEDI K, et al. State-of-the-art review of metallic dampers: Testing, development and implementation[J]. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 2020, 27(2): 455-478. DOI: 10.1007/s11831-019-09329-9.
- [6] MORGEN B G, KURAMA Y C. A friction damper for post-tensioned precast concrete moment frames[J]. *PCI Journal*, 2004, 49(4): 112-133. DOI: 10.15554/pci.07012004.112.133.
- [7] 唐九如. 钢筋混凝土框架节点抗震研究的新进展[J]. *工程抗震*, 1989(4): 39-43. DOI: 10.16226/j.issn.1002-8412.1989.04.010.
- TANG Jiuru. New progress in seismic research of reinforced concrete frame joints[J]. *Earthquake Resistant Engineering*, 1989(4): 39-43. DOI: 10.16226/j.issn.1002-8412.1989.04.010. (in Chinese)
- [8] 刘季, 陈月明. 粘弹性阻尼器结构的减震研究[J]. *哈尔滨建筑大学学报*, 1998(5): 1-7.
- LIU Ji, CHEN Yueming. State-of-the art of seismic response of structures with added viscoelastic dampers[J]. *Journal of Harbin University of Civil Engineering and Architecture*, 1998(5): 1-7. (in Chinese)
- [9] 徐昕. 新型扇形铅粘弹性阻尼器性能及应用研究[D]. 广州: 广州大学, 2012.
- XU Xin. Study on performance and application of a new type of fan-shaped lead viscoelastic damper[D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2012. (in Chinese)
- [10] 田旭. 新型减震节点阻尼器及其框架结构抗震性能[D]. 大连: 大连交通大学, 2020.
- Tian Xu. A new type of joint damper and its seismic performance of frame structure[D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2020. (in Chinese)
- [11] MAHMOODI P. Structural dampers[J]. *Journal of the Structural Division*, 1969, 95(8): 1661-1672. DOI: 10.1061/jsdeag.0002333.
- [12] SAMALI B, KWOK K C S. Use of viscoelastic dampers in reducing wind- and earthquake-induced motion of building structures[J]. *Engineering Structures*, 1995, 17(9): 639-654. DOI: 10.1016/0141-0296(95)00034-5.
- [13] 徐赵东, 史春芳. 黏弹性阻尼器的试验研究与减震工程实例[J]. *土木工程学报*, 2009, 42(6): 55-60. DOI: 10.15951/j.tmgxcb.2009.06.021.
- XU Zhaodong, SHI Chunfang. Experimental study of viscoelastic dampers for mitigation of earthquake effects[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2009, 42(6): 55-60. DOI: 10.15951/j.tmgxcb.2009.06.021. (in Chinese)
- [14] 周云, 方东健, 商城豪, 等. 复合(组合)消能器研究与应用[J]. *建筑结构*, 2024, 54(19): 35-43. DOI: 10.19701/j.jzjg.BW24015.
- ZHOU Yun, FANG Dongjian, SHANG Chenghao, et al. Research and application of composite energy dissipator[J]. *Building Structure*, 2024, 54(19): 35-43. DOI: 10.19701/j.jzjg.BW24015. (in Chinese)
- [15] 钱鹏. 上海张江双子塔结构设计关键问题[J]. *建筑结构*, 2022, 52(10): 34-41. DOI: 10.19701/j.jzjg.HDY2206.
- QIAN Peng. Key issues in structural design of Shanghai Zhangjiang twin towers[J]. *Building Structure*, 2022, 52(10): 34-41. DOI: 10.19701/j.jzjg.HDY2206. (in Chinese)
- [16] 吴胜, 周云. 海南某小学食堂减震设计分析[J]. *建筑结构*, 2021, 51(增刊1): 837-843.
- WU Sheng, ZHOU Yun. Energy dissipation analysis of a primary school canteen in Hainan[J]. *Building Structure*, 2021, 51(Suppl.1): 837-843. (in Chinese)
- [17] 吴芸, 张其林, 王旭峰. 钢框架抗震性能试验研究和数值分析[J]. *西安建筑科技大学学报(自然科学版)*, 2006, 38(4): 486-490. DOI: 10.3969/j.issn.1006-7930.2006.04.008.
- WU Yun, ZHANG Qilin, WANG Xufeng. Experimental and numerical studies on seismic behavior of steel frame[J]. *Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition)*, 2006, 38(4): 486-490. DOI: 10.3969/j.issn.1006-7930.2006.04.008. (in Chinese)
- [18] 房晓俊, 周云. 复杂受力状态下铅黏弹性连梁阻尼器性能研

- 究[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(增刊2): 321-327. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2018.S2.044.
- FANG Xiaojun, ZHOU Yun. Performance of lead viscoelastic coupling beam damper under complex loading condition [J]. Journal of Building Structures, 2018, 39 (Suppl. 2) : 321-327. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2018.S2.044. (in Chinese)
- [19] 路瑶. PEC柱组合结构框架中节点抗震性能试验研究[D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2019.
- LU Yao. Experimental study on seismic behavior of joints in PEC column composite structure frame [D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science & Technology, 2019. (in Chinese)
- [20] 贾王龙, 李永刚, 董夏琦, 等. 部分包覆钢-混凝土组合中心支撑框架抗震性能研究[J]. 建筑钢结构进展, 2025, 27(4): 87-99. DOI: 10.13969/j.jzgjgzb.20231024001.
- JIA Wanglong, LI Yonggang, DONG Xiaqi, et al. Seismic performance of partially encased composite concentrically braced frames[J]. Progress in Steel Building Structures, 2025, 27 (4) : 87-99. DOI: 10.13969/j. jzgjgzb. 2023 1024001. (in Chinese)
- [21] 李成玉, 姚宗杰, 张睿, 等. 摩擦耗能型摇摆柱节点抗震性能研究[J]. 建筑钢结构进展, 2024, 26(2): 1-12. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2024.02.001.
- LI Chengyu, YAO Zongjie, ZHANG Rui, et al. Seismic performance of rocking column joints with Friction dissipation [J]. Progress in Steel Building Structures, 2024, 26 (2) : 1-12. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2024.02.001. (in Chinese)
- [22] 孙飞飞, 侯玉芳, 李承铭. 转动型阻尼器及转动型耗能节点研究现状[J]. 建筑钢结构进展, 2016, 18(6): 1-11, 41. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2016.06.001.
- SUN Feifei, HOU Yufang, LI Chengming. A review on rotational dampers and rotational energy dissipating joints [J]. Progress in Steel Building Structures, 2016, 18 (6) : 1-11, 41. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2016.06.001. (in Chinese)
- [23] XU Z D. Earthquake mitigation study on viscoelastic dampers for reinforced concrete structures [J]. Journal of Vibration and Control, 2007, 13(1): 29-43. DOI: 10.1177/1077546306068058.
- [24] 凌彬. 扇形铅黏弹性阻尼器加固节点设计方法研究[D]. 广州: 广州大学, 2023.
- LING Bin. The fan lead viscoelastic damper reinforcement node design method research [D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2023. (in Chinese)
- [25] LAI M L, LU P, LUNSFORD D A, et al. Viscoelastic damper: a damper with linear or nonlinear material [C]//Proceedings of 11th World Conference on Earthquake Engineering, 1996.
- [26] 张良, 李忠华, 马新强. 橡胶 Mooney-Rivlin 超弹性本构模型的参数特性研究[J]. 噪声与振动控制, 2018, 38(增刊1): 427-430. DOI: 10.3969/j.issn.1006-1355.2018.Z1.091.
- ZHANG Liang, LI Zhonghua, MA Xinqiang. Study on parameter characteristics of rubber mooney-rivlin model [J]. Noise and Vibration Control, 2018, 38(Suppl.1): 427-430. DOI: 10.3969/j.issn.1006-1355.2018.Z1.091. (in Chinese)
- [27] 周福霖. 工程结构减震控制[M]. 北京: 地震出版社, 1997.
- ZHOU Fulin. Seismic control of engineering structure [M]. Beijing: Seismological Press, 1997. (in Chinese)