引用格式：张爱林，王雨燊，姜子钦．不同组合形式的复合耗能阻尼器抗震性能研究[J]．工业建筑，2026，56(1)：70-79．ZHANG Ailin，WANG Yushen，JIANG Ziqin．Research on Seismic Performance of Composite Energy-Dissipation Dampers with Different Combinations[J]．Industrial Construction，2026，56(1)：70-79 (in Chinese)．DOI：10.3724/j.gyjzG25040207

不同组合形式的复合耗能阻尼器抗震性能研究

张爱林[1,2]　王雨燊[1]　姜子钦[1,2]

（1. 北京工业大学建筑工程学院，北京　100124；2. 北京工业大学北京市高层和大跨度预应力钢结构工程技术研究中心，北京　100124）

摘　要　为满足基于性能抗震设计对金属阻尼器提出的更高要求，结合工业化装配式理念，通过将U型阻尼器(UDs)与狭缝钢板阻尼器相结合，提出了3种不同组合形式的复合耗能阻尼器：单阶段复合耗能阻尼器(SSYCD)、双阶段复合耗能阻尼器(DSYCD)和刚度增强型双阶段复合耗能阻尼器(RDSYCD)。利用有限元软件ABAQUS对传统的UD以及3种新型复合耗能阻尼器进行抗震性能对比研究，分析了其滞回曲线、骨架曲线、耗能量和等效黏滞阻尼系数的差异。分析结果表明：与UD相比，SSYCD在减少28.20%用钢量的前提下显著提升了阻尼器的初始刚度及耗能量，增幅分别达到150.16%和250.57%；DSYCD能够实现预期的双阶段屈服工作机制，但其初始刚度及耗能量较低；RDSYCD呈现出预期的双阶段屈服工作机制，且和SSYCD用钢量相近时，其初始刚度、极限承载力和耗能量比SSYCD相应提升6.28%、44.55%和11.03%。

关键词　装配式钢结构；复合耗能阻尼器；抗震性能；数值分析

Research on Seismic Performance of Composite Energy-Dissipation Dampers with Different Combinations

ZHANG Ailin[1,2]　WANG Yushen[1]　JIANG Ziqin[1,2]

(1. *College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing* 100124, *China*; 2. *Beijing Engineering Research Center of High-Rise and Large-Span Prestressed Steel Structure, Beijing University of Technology, Beijing* 100124, *China*)

Abstract: To meet the higher requirements of performance-based seismic design and incorporate the concept of industrialized prefabrication, three new types of composite energy-dissipation dampers are proposed by integrating U-shaped dampers (UDs) with slitted steel plate dampers: single-stage yielding composite energy-dissipation damper (SSYCD), double-stage yielding composite energy-dissipation damper (DSYCD), and reinforced double-stage yielding composite energy-dissipation damper (RDSYCD). Using the finite element software ABAQUS, a comparative study on the seismic performance between the traditional UD and the three new composite energy-dissipation dampers was conducted, analyzing the differences in their the hysteresis curves, skeleton curves, energy dissipation capacity, and equivalent viscous damping coefficients. The results showed that, compared to UD, SSYCD significantly improved the initial stiffness and energy dissipation capacity of the damper on the premise of reducing the steel consumption by 28.20%, with increases of 150.16% and 250.57%, respectively; DSYCD achieved the intended double-stage yielding working mechanism with relatively

第一作者：张爱林，教授，博士生导师，主要从事装配式钢结构方面的研究，zhangal@bjut.edu.cn。

通信作者：姜子钦，教授，博士生导师，主要从事装配式钢结构方面的研究，jzqbj2010@163.com。

收稿日期：2025-04-02

low initial stiffness and energy dissipation capacity; RDSYCD achieved the intended double-stage yielding working mechanism, and when the steel consumption was similar to that of SSYCD, its initial stiffness, ultimate bearing capacity, and energy dissipation capacity increased by 6.28%, 44.55%, and 11.03%, respectively, compared with SSYCD.

Keywords: prefabricated steel structure; composite energy-dissipation damper; seismic performance; numerical analysis

0　引　言

装配式钢结构具有标准化设计、工厂化生产、工期短、自重轻、钢结构可回收、循环使用等优点，符合可持续发展的要求，是全生命周期内的绿色建筑，是现代化建筑结构的必然发展方向[1-2]。地震的突发性和复杂性使得现有科技手段难以实现对其的精准预测，强烈的地震作用对人民生命和财产安全构成了严重威胁。与传统的抗震设计相比，消能减震技术可以增加结构的耗能能力，并将损伤控制在消能减震构件上，从而显著降低地震响应和结构损伤，已被广泛应用于性能化抗震设计中[3]。经过数十年的发展，出现了各种形式的耗能装置，按其耗能机理可分为：位移相关型阻尼器和速度相关型阻尼器。位移相关型阻尼器包括金属屈服阻尼器和摩擦阻尼器等，速度相关型阻尼器指黏滞阻尼器和黏弹性阻尼器等。金属阻尼器凭借良好的变形能力、优异的滞回性能和低成本，成为广泛应用的消能减震装置之一[4]。

然而，基于性能的抗震设计对阻尼器提出了更高要求，传统金属阻尼器仅具单一屈服点，如果仅针对设防、罕遇地震设计，在多遇地震下难以屈服耗能，尽管提供了较大的附加刚度，缩短了结构周期，却可能导致结构在更强烈的地震中遭受不利影响。反之，若阻尼器只针对多遇地震设计，则在设防、罕遇地震时耗能能力不足[5]。因此亟需提出一种能够在罕遇、设防、多遇地震下均有效耗能的分级屈服型阻尼器，以更全面提升结构的抗震性能。Zhai 等[6]将多屈服点阻尼器应用于现有结构，通过合理设计后满足了四个界限水准下的结构性能需求，证明这种分级屈服阻尼器能够有效控制多地震水准下的结构动力响应，对于实现基于性能的抗震设计具有重大意义。因此，许多学者对分阶段耗能的阻尼器进行了研究。Li 等[7]提出了一种剪切-弯曲复合型阻尼器，该阻尼器由剪切型矩形钢板和弯曲型 X 形钢板组合而成，能够在不同阶段实现屈服特性。这种设计充分利用了剪切与弯曲的不同变形模式，在初始阶段以剪切型钢板屈服吸能，而在更大变形阶段则由 X 形钢板逐步屈服，从而实现多级耗能的效果。Chen 等[8]提出了一种由两个大小不同的环形金属阻尼器嵌套而成的分级屈服阻尼器，其分阶段屈服特征较为明显，且拥有良好的变形和抗疲劳性能。吴山等[9]针对传统金属阻尼器在多遇地震下难以发挥耗能作用的问题，提出一种新型金属套管阻尼器，通过屈服位移不同的耗能钢条实现二阶段分级屈服，并通过理论推导和试验数据拟合给出刚度、屈服荷载和屈服位移的设计公式。以上研究表明，目前金属阻尼器对于分阶段形式的实现方法主要有：1）通过组合不同受力形式的阻尼器，在小位移条件下剪切型首先屈服，同时弯曲型保持弹性，位移增大后弯曲型屈服参与耗能。但是此种阻尼器形式构造复杂，加工精度要求较高，且多采用焊接连接，不符合绿色建筑的要求。2）利用不同阻尼器尺寸的屈服位移差异。通过调整阻尼器的尺寸，使其在荷载作用下实现先后屈服耗能，然而采用这种方法的阻尼器分阶段效果不够显著，且占用较多空间。3）通过精确控制材料的材性及阻尼器刚度等自身力学性能，实现不同的屈服位移。这种方法多采用低屈服点钢，因增加了成本而限制了应用范围。

U 型阻尼器（U-Shaped Damper, UD）是常用的金属阻尼器类型之一，利用钢板平面外等厚度处屈服来进行弹塑性变形耗能，具有优越的塑性变形能力、稳定的滞回能力和良好的抗疲劳能力[10]。但是其存在初始刚度较小，屈服承载力退化明显等问题[11]。狭缝钢板阻尼器（Steel Slit Damper, SSD）通过弯曲单元的平面内弯曲变形来消耗地震能量，调整开缝的位置可以对其刚度和强度进行灵活设计。这种面内受力的耗能机制不仅提供了较高的初始刚度和承载力，还能显著提升变形能力[12]。在地震作用下，狭缝钢板阻尼器拥有稳定的滞回性能和良好的能量耗散能力[13]。

针对当前金属阻尼器存在的构造复杂、分阶段效果不显著及应用成本高等问题，将U型阻尼器与狭缝钢板阻尼器相结合，提出了3种构造形式不同的金属阻尼器，并对其抗震性能进行对比研究。

1　不同组合形式的金属阻尼器的构造组成与工作机理

不同组合形式的金属阻尼器构造如图1所示。单阶段复合耗能阻尼器（Single-Stage-Yield Composite Energy Dissipation Damper，SSYCD）由UD和SSD组合而成。SSD布置在UD的平直段中心，且SSD中轴线与UD中轴线在同一平面内。SSD的焊缝方向沿其长边方向设置，UD则预留连接段，通过高强螺栓将阻尼器与结构主体相连。作为一种新型复合位移型阻尼器，该装置通过SSD和UD的屈服来实现耗能。

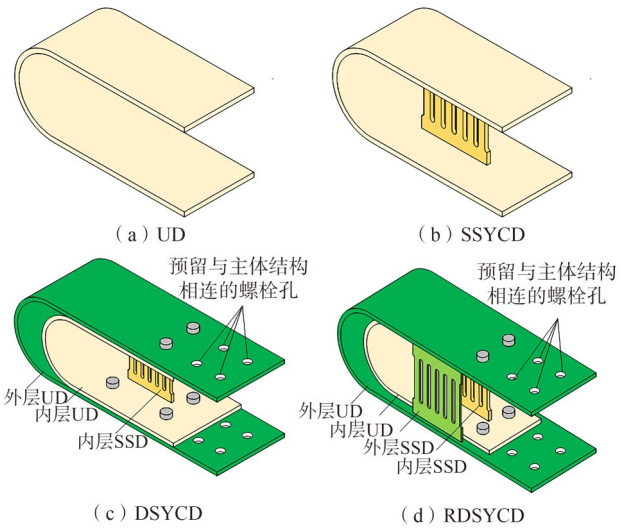


图1　不同组合形式的金属阻尼器构造示意

Fig. 1　Construction diagrams of metal dampers with different combination forms

当前基于性能的抗震设计中，消能减震阻尼器需要能够应对多级地震水准的作用。由于单阶段复合耗能阻尼器缺乏明显的多阶段耗能机制，难以满足这样的要求。为此，基于多阶段屈服的概念提出了一种双阶段复合耗能阻尼器（Double-Stage-Yield Composite Energy Dissipation Damper，DSYCD）。该阻尼器的具体构造和组装图分别如图1(c)和图2(a)所示，在SSYCD的外层嵌套UD，二者通过高强螺栓连接，且仅在内层UD上开设长圆孔。阻尼器处于一阶工作阶段，外层UD作为第一耗能单元（Primary Energy-Dissipating Component，PEC）首先受力并带动滑动螺栓在长圆孔内滑动，当螺栓滑至长圆孔端部卡住后，阻尼器进入二阶工作阶段（此时的位移称为DSYCD的二阶启动位移），带动内层SSYCD作为第二耗能单元（Secondary Energy-Dissipating Component，SEC）共同耗能。

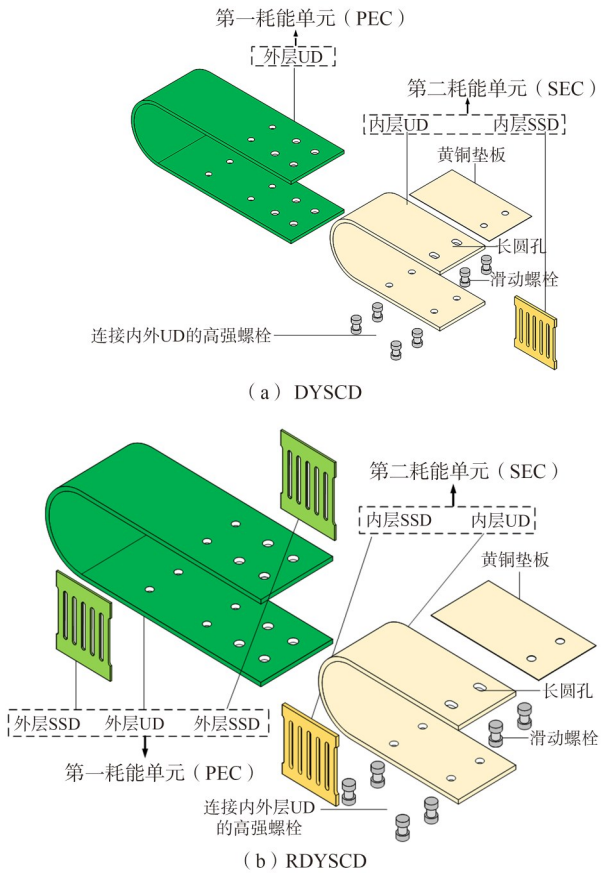
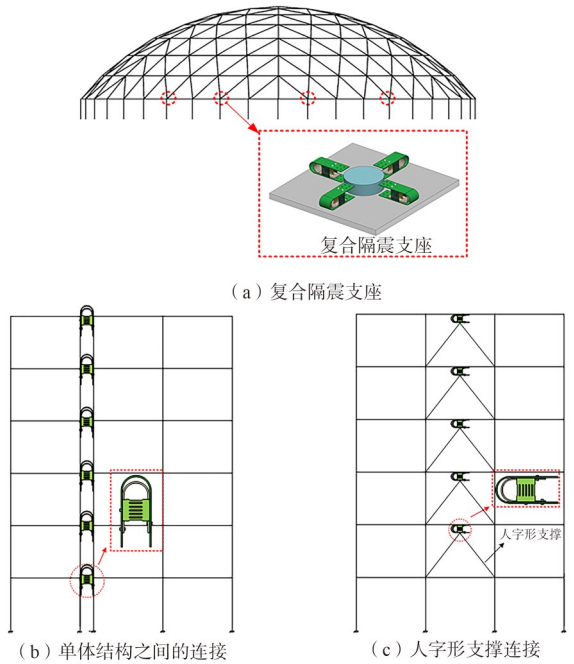


图2　DYSCD和RDSYCD的组装

Fig. 2　Assembly drawings of DYSCD and RDSYCD

通过缩小DSYCD内层UD的宽度，并在其外层UD上再设置两块SSD以提升阻尼器在一阶工作时的刚度及承载能力，提出一种刚度增强型双阶段复合耗能阻尼器（Reinforced Double-Stage-Yield Composite Energy Dissipation Damper，RDSYCD）。RDSYCD整体的工作机制与DSYCD相似，此处不再赘述。不同的是，RDSYCD的PEC由外层两块SSD与外层UD组合而成，RDSYCD的具体构造和组装分别如图1(d)和图2(b)所示。

所提出的阻尼器可以应用于不同的结构体系。例如与隔震支座配对应用于大跨度空间结构中，或者作为耗能部件布置到框架体系中，如图3所示。



（a）复合隔震支座　（b）单体结构之间的连接　（c）人字形支撑连接

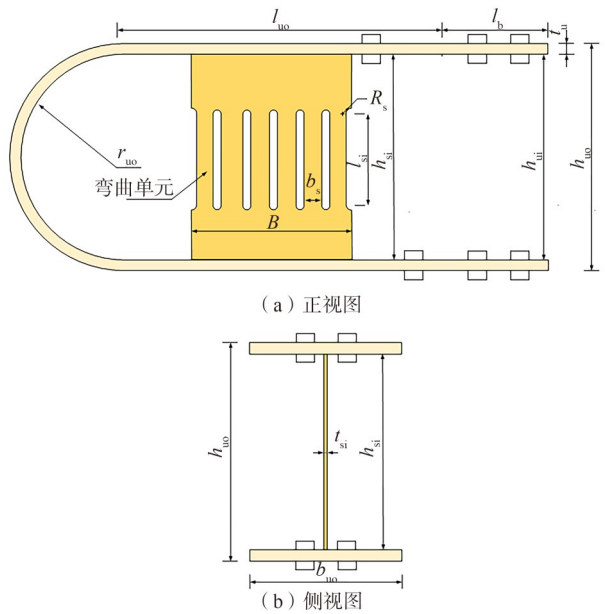
图 3　阻尼器应用的示意

Fig. 3　Schematic diagrams of the application of the damper

2　有限元模型的建立验证

2.1　算例设计

SSYCD 各相关设计参数如图 4 所示。其中，l_{uo} 为外层的平直段长度，l_b 为预留与主体结构相连的连接段长度，h_{uo} 为阻尼器的高度，r_{uo} 为外层 UD 圆弧半径，t_u 为外层 UD 厚度，b_{uo} 为外层 UD 宽度，l_{si} 为内层 SSD 弯曲单元长度，b_s 为内层 SSD 弯曲单元宽度，t_{si} 为内层 SSD 弯曲单元厚度，R_s 为内层 SSD 开缝半径。

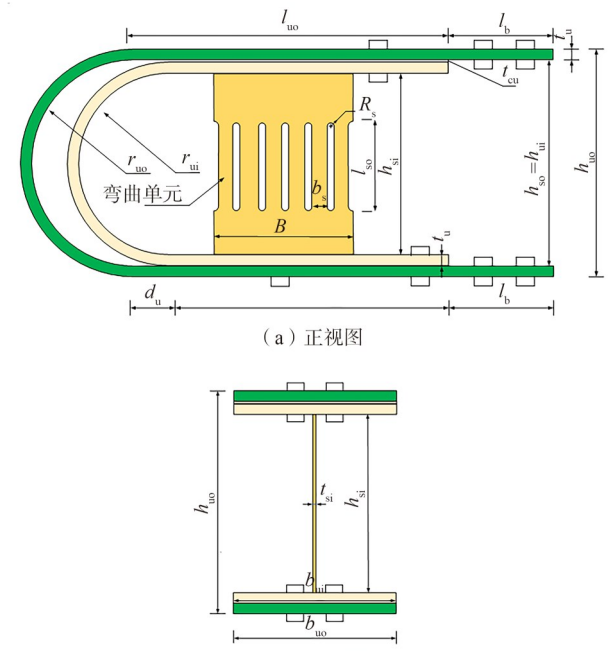


（a）正视图　（b）侧视图

图 4　SSYCD 尺寸

Fig. 4　Dimensional drawings of SSYCD

DSYCD 各相关设计参数如图 5 所示。其中，l_{uo} 和 l_{ui} 分别为外层和内层 UD 平直段长度，l_b 为预留与主体结构相连的连接段长度，h_{uo} 为阻尼器的高度，r_{uo} 和 r_{ui} 分别为外层和内层 UD 圆弧半径，外层和内层 UD 厚度均为 t_u，b_{uo} 和 b_{ui} 分别为外层和内层 UD 的宽度，l_{ck} 为内层 UD 上端平直段上开设长圆孔的平直段长度，使得 DSYCD 的二阶启动位移为 5 mm，也即 0.025 rad（由 DSYCD 高度 h_{uo} 换算得到）；l_{si} 为内层 SSD 弯曲单元长度，b_s 为内层 SSD 弯曲单元宽度，t_{si} 为内层 SSD 弯曲单元的厚度，R_s 为内层 SSD 开缝半径。



（a）正视图

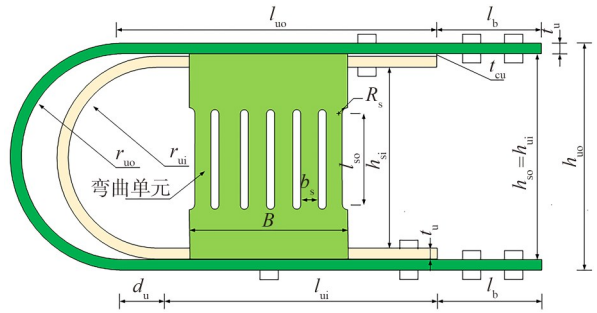
（b）侧视图

图 5　DSYCD 尺寸

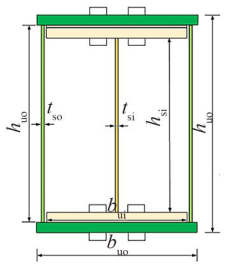
Fig. 5　Dimensional drawings of DSYCD

RDSYCD 各相关设计参数如图 6 所示。其中，l_{uo} 和 l_{ui} 分别为外层和内层 UD 平直段长度，l_b 为预留与主体结构相连的连接段长度，h_{uo} 为阻尼器的高度，r_{uo} 和 r_{ui} 分别为外层和内层 UD 圆弧半径，外层和内层 UD 厚度均为 t_u，b_{uo} 和 b_{ui} 分别为外层和内层 UD 的宽度，l_{ck} 为内层 UD 上端平直段上开设长圆孔的平直段长度；l_{so} 和 l_{si} 分别为外层和内层 SSD 弯曲单元长度，外层和内层 SSD 弯曲单元的宽度相同，均为 b_s，t_{so} 和 t_{si} 分别为外层和内层 SSD 弯曲单元厚度，外层和内层 SSD 开缝半径相同，均为 R_s。

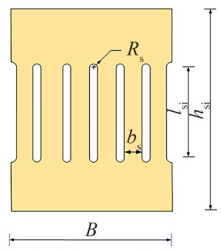
为评估 3 种不同组合形式的阻尼器及其与 UD 的抗震性能差异，将 4 种金属阻尼器的主要参数列于表 1。设计原则如下：首先基于与 UD 极限承载力相近的原则设计 SSYCD；对于 DSYCD 及 RDSYCD，



（a）正视图



（b）侧视图



（c）内层SSD正视图

图6 RDSYCD尺寸

Fig. 6 Dimensional drawings of RDSYCD

基于同SSYCD用钢量相近的原则进行设计。

2.2 模型建立

采用有限元软件ABAQUS对阻尼器进行数值模型分析。有限元模型如图7所示，阻尼器模拟均采用8结点线性六面体减缩积分实体单元（C3D8R），UD的网格沿厚度方向划分为两层。考虑

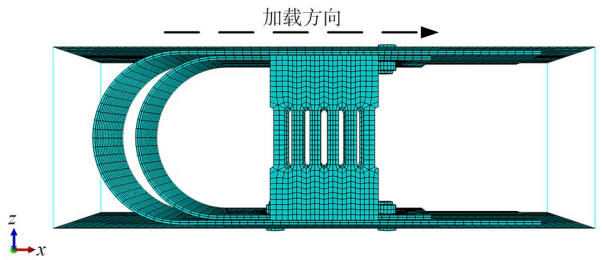
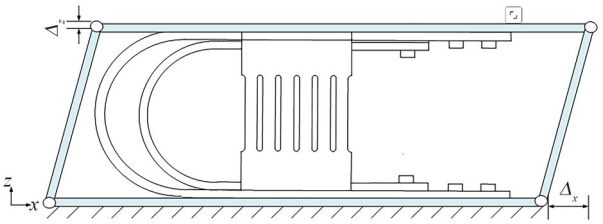


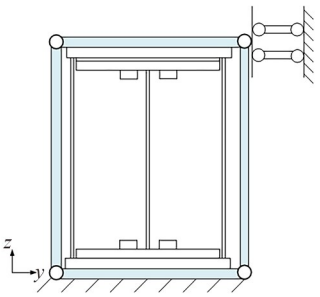
图7 有限元模型

Fig. 7 Finite element model

到阻尼器在实际工作状态中轴向力的影响不可忽略[14]，设计了如图8所示的加载装置以模拟阻尼器在实际情况下的复合受力状态。加载装置由上下约束刚体和连接刚体的约束柱组成：下约束刚体完全固接，限制其6个自由度；对约束柱和上约束刚体，约束y向的位移以及沿z轴与x轴的转动，释放x向和z向的位移。在上约束刚体面上耦合一个加载点，施加x向的位移。在荷载作用下，阻尼器会同时实现沿x轴的平动以及沿z向的下降。



（a）正视图



（b）侧视图

图8 加载装置示意

Fig. 8 Schematic diagrams of the loading device

阻尼器主体各部分均采用Q235钢材，考虑了材料应变强化的混合强化模型。具体参数见表2。其中：$\sigma|_0$为等效塑性应变为0时的应力；Q_∞为屈服面最大变化值；b_{iso}为屈服面随着塑性应变的增加而变化的比率；C_i/γ_i代表了背应力的最大变化值，采用多背应力叠加的方式可得到更为准确的结果，选取i=1~4。

表1 4种金属阻尼器的主要参数

Table 1 Key parameters of four types of metal dampers

编号	l_{uo}/mm	l_{ui}/mm	h_{uo}/mm	t_u/mm	b_{uo}/mm	b_{ui}/mm	l_{ck}/mm	l_{so}/mm	l_{si}/mm	b_s/mm	t_{so}/mm	t_{si}/mm	极限承载力/kN	用钢量/kg
UD	350	—	200	15	200	—	—	—	—	—	—	—	43.80	30.32
SSYCD	350	—	200	10	200	—	—	—	75	15	—	8	46.99	21.77
DSYCD	350	300	200	6	200	200	8	—	75	15	—	8	47.72	21.98
RDSYCD	350	300	200	6	200	160	8	75	75	15	4	8	67.75	21.72

根据JG/T 209—2012《建筑消能阻尼器》，使用位移控制方式进行加载，位移由外层U型钢带上下端相对转角换算而得，以0.1 rad作为最大加载级幅值，并以0.025 rad作为每一级加载的转角增量，每

表 2　混合强化模型的参数

Table 2　Parameters of the combined hardening model

钢号	$\sigma\|_0$/MPa	Q_∞/MPa	b_{iso}/mm	C_1/MPa	γ_1	C_2/MPa	γ_2	C_3/MPa	γ_3	C_4/MPa	γ_4
Q235	267	52	1.9	11185	626	7659	166	611	16	574	16

一级循环两次，加载制度如图 9 所示。

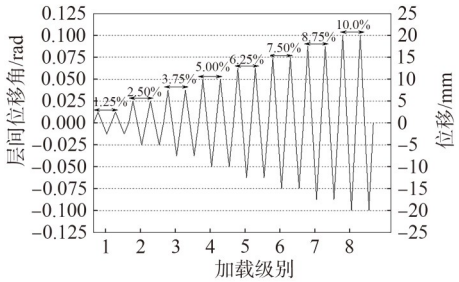
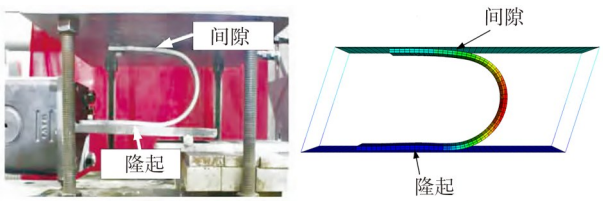


图 9　加载制度

Fig. 9　Loading protocol

2.3　模型验证

为验证有限元模型的准确性，采用相同的有限元建模方法对杜红凯等[15-16]试验中的第 1 类软钢 U 型钢板进行模拟。试验与模拟的变形对比结果如图 10 所示。图 11 中展示了试验与有限元模拟所得的荷载-位移曲线。可以看出，有限元模型与试验吻合较好，表明了本文建模方法的准确性。



（a）试验　（b）有限元

图 10　试验与有限元变形的比较

Fig. 10　Comparison of test and finite element deformation

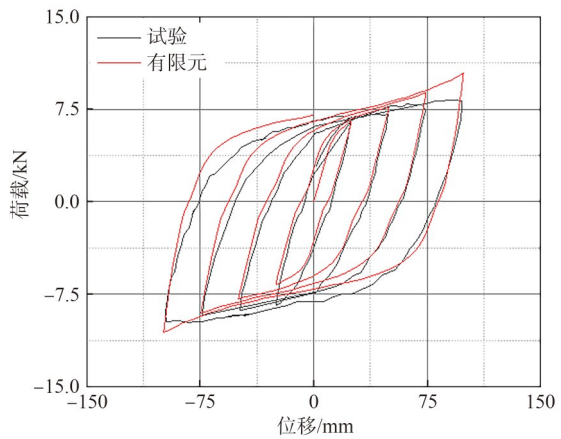


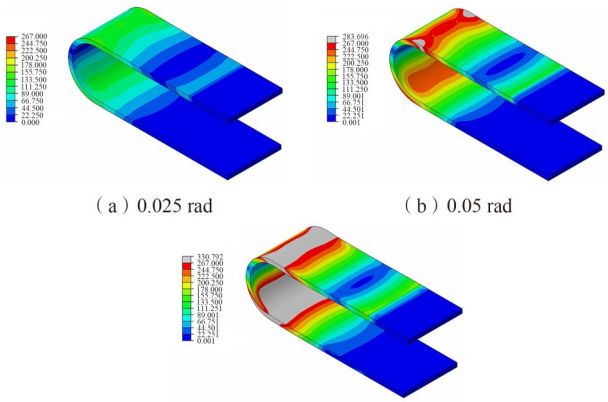
图 11　试验与有限元滞回曲线的对比

Fig. 11　Comparison of test and finite element hysteresis curves

3　不同组合形式的金属阻尼器的抗震性能优越性分析

3.1　UD 与 SSYCD 结果对比

UD 的变形及应力分布如图 12 所示。可以看出，在加载初期应力较小，随着加载位移的增大，应力主要集中于圆弧段与平直段的连接处，平直段几乎保持弹性。



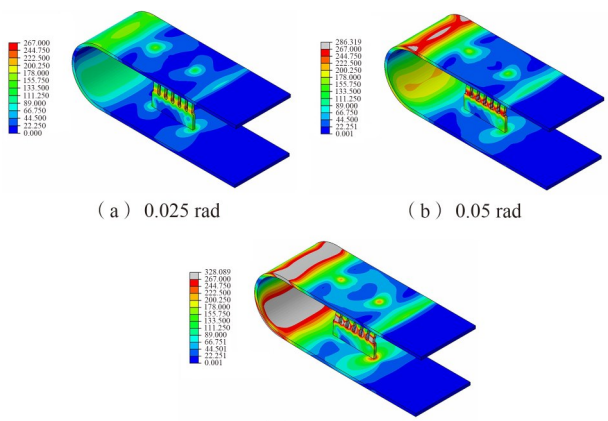
（a）0.025 rad　（b）0.05 rad

（c）0.1 rad

图 12　UD 的变形及应力云图　MPa

Fig. 12　Deformation and stress contour plots of UD

SSYCD 的变形及应力分布如图 13 所示。可见：在加载至 0.025 rad 时，SSD 先于 UD 屈服耗能，且应力主要集中于弯曲单元端部；当加载至 0.05，0.1 rad 时，SSD 和 UD 的应力水平持续发展。最终应力主要集中于 UD 平直段与圆弧段连接处以及 SSD 弯曲单元端部。



（a）0.025 rad　（b）0.05 rad

（c）0.1 rad

图 13　SSYCD 的变形及应力云图　MPa

Fig. 13　Deformation and stress contour plots of SSYCD

在低周反复荷载作用下，阻尼器的耗能能力主要通过滞回曲线的饱满程度来体现：滞回曲线越饱满，说明其耗能能力越强，抗震性能越佳。等效黏滞阻尼系数ζ_{eq}的计算式见式(1)。等效黏滞阻尼系数越大，反映滞回曲线越饱满。

$$\zeta_{eq}=\frac{S_{ABCDA}}{2\pi(S_{OBE}+S_{ODF})} \tag{1}$$

式中：S_{ABCDA}为滞回曲线与横轴所围面积；S_{OBE}和S_{ODF}为最大位移加载点与坐标轴围成的三角形面积。各面积示意如图14所示。

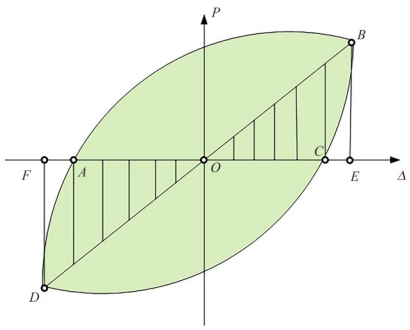


图14 等效黏滞阻尼系数计算示意

Fig. 14 Calculation diagram of equivalent viscous damping coefficients

UD及SSYCD的主要指标曲线如图15所示。可以看出：在极限承载力相近的前提下，SSYCD滞回曲线比UD更加饱满，其各项抗震性能指标也均有所提升；UD和SSYCD的初始刚度分别为3.15，7.87 kN/mm，增幅达到150.16%；在各加载级下SSYCD的耗能量显著高于UD，当相对转角达到0.1 rad时，UD的总耗能量为4.48 kJ，而SSYCD总耗能量为15.69 kJ，增幅达到250.57%；SSYCD的等效黏滞阻尼系数在整个加载过程中较为稳定，反映其拥有饱满的滞回曲线；UD的等效黏滞阻尼系数在加载初期较小，随着位移的增加开始逐步增加，这与其滞回曲线的发展规律一致。以上结果说明SSYCD通过UD与SSD的结合，在极限承载力相近的前提下，用钢量减少了28.20%，并且各项性能指标优于UD，证明SSYCD的抗震性能要优于UD。

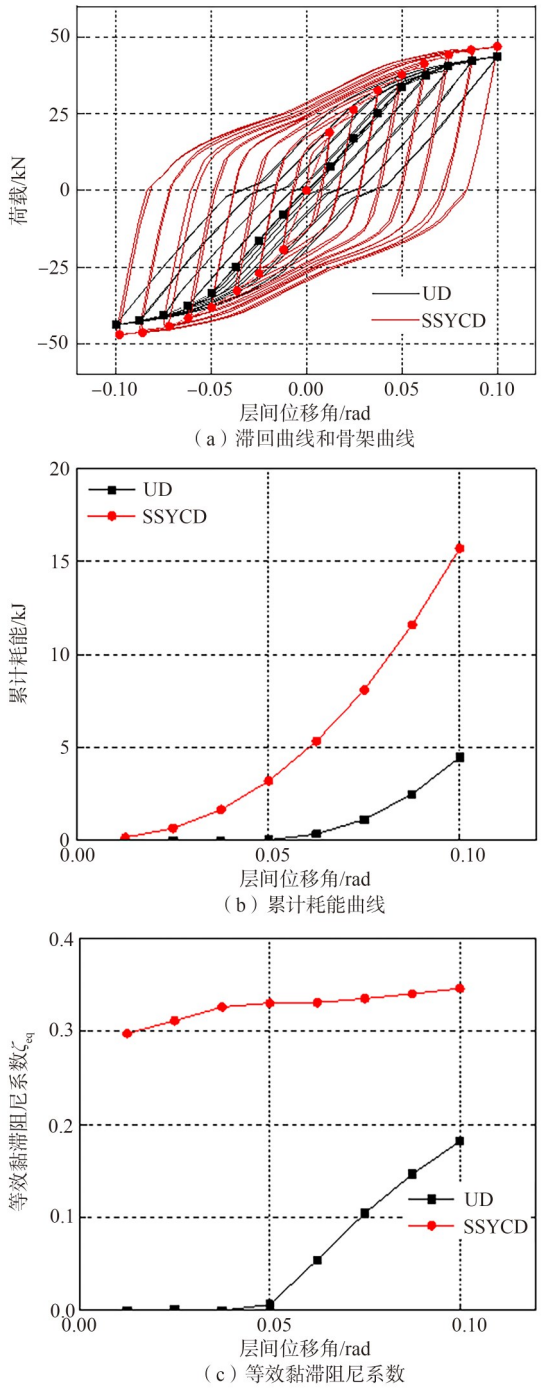


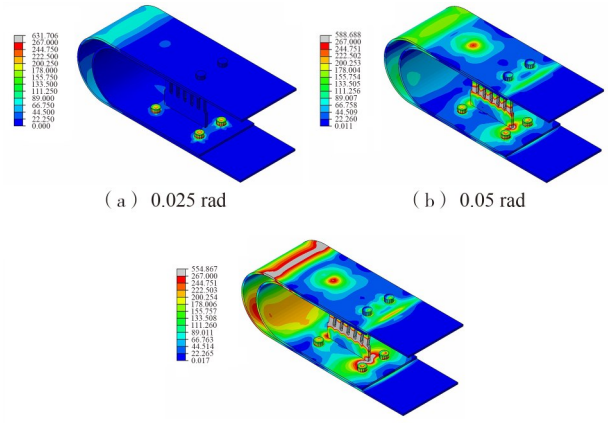
图15 UD及SSYCD的主要指标曲线

Fig. 15 Main index curves of UD and SSYCD

3.2 SSYCD与DYSCD结果对比

SSYCD和DSYCD的变形及应力分布如图16所示。可见，在加载过程中，DSYCD表现出较为明显的双阶段屈服工作机制：在达到设计的二阶启动位移0.025 rad前，DSYCD处于一阶工作阶段。此时主要的受力部件为PEC，内层SEC处于弹性状态；当加载至0.05 rad时，PEC应力持续发展，SEC开始参与工作，且内层SSD先于内层UD屈服耗能；当加载至0.1 rad，PEC和SEC都进入屈服状态，应力主要集中于UD平直段与圆弧段连接处以及SSD弯曲单元端部。

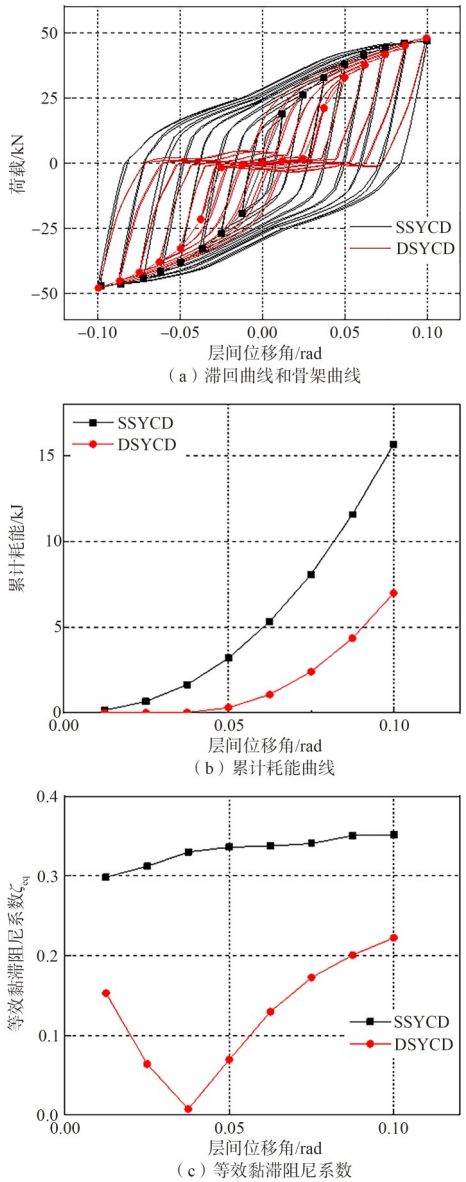
DSYCD的主要指标曲线如图17所示。可以看出，当加载位移小于0.025 rad，DSYCD处于一阶工作阶段。此时DYSCD的初始刚度仅为0.39 kN/mm，远



（a）0.025 rad　（b）0.05 rad　（c）0.1 rad

图 16　DSYCD 的变形及应力云图　MPa

Fig. 16　Deformation and stress contour plots of DSYCD



（a）滞回曲线和骨架曲线

（b）累计耗能曲线

（c）等效黏滞阻尼系数

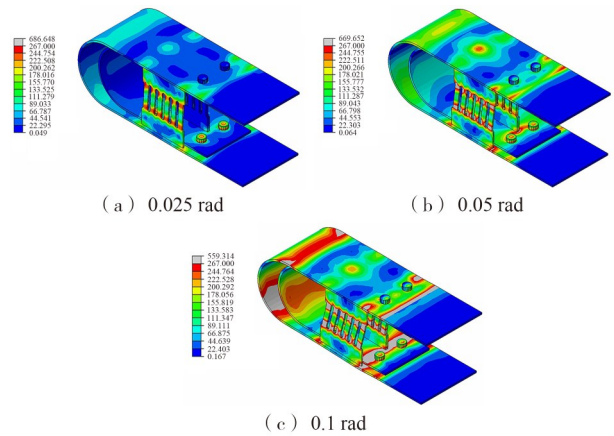
图 17　DSYCD 及 SSYCD 的主要指标曲线

Fig. 17　TMain index curves of SSYCD and SSYCD

小于 SSYCD 的 7.87 kN/mm。在各加载级下 DSYCD 的耗能量均低于 SSYCD。当相对转角达到 0.1 rad 时，SSYCD 与 DSYCD 的总耗能量分别为 15.69 kJ 和 6.99 kJ。SSYCD 的等效黏滞阻尼系数在各加载级下均高于 DSYCD。以上分析说明 DSYCD 能够实现预期的双阶段工作机制，但其一阶工作阶段的刚度及承载能力较低，导致整体耗能能力较差。

3.3　SSYCD 与 RDSYCD 结果对比

RDSYCD 的变形及应力分布如图 18 所示。可以看出，在加载过程中，RDSYCD 表现出较为明显的双阶段屈服工作机制：在达到设计的二阶启动位移 0.025 rad 前，RDSYCD 处于一阶工作状态。此时主要的受力部件为 PEC，内层 SEC 仍处于弹性状态，且外层 SSD 先于外层 UD 屈服耗能；当加载至 0.05 rad，PEC 应力持续发展，同时 SEC 也参与受力，内层 SSD 的应力水平高于内层 UD；当加载至 0.1 rad，PEC 和 SEC 都进入屈服状态，应力主要集中于 UD 平直段与圆弧段连接处以及 SSD 弯曲单元端部。



（a）0.025 rad　（b）0.05 rad　（c）0.1 rad

图 18　RDSYCD 的变形及应力云图　MPa

Fig. 18　Deformation and stress contour plots of RDSYCD

RDSYCD 的主要指标曲线如图 19 所示。可以看出，当加载位移小于 0.025 rad，RDSYCD 处于一阶工作阶段。此时 RDSYCD 的初始刚度为 8.37 kN/mm，相较于 SSYCD 增加了 6.28%。RDSYCD 和 SSYCD 的极限荷载分别为 67.88 kN 和 46.96 kN，增幅为 44.55%。同时，加载初期 RDSYCD 与 SSYCD 的耗能量接近，随着位移增加，RDSYCD 的耗能量逐渐超过 SSYCD。当相对转角达到 0.1 rad 时，RDSYCD 与 SSYCD 的总耗能量分别为 17.42 kJ 和 15.69 kJ，增幅为 11.03%。RDSYCD 的等效黏滞系数总是小于 SSYCD，但较 DSYCD 相比有所提升，这一点通过观察滞回曲线的饱满程度也能得到进一步佐证：RDSYCD

的滞回曲线呈现出较为明显的双阶段工作屈服机制，其饱满程度虽不及SSYCD，但明显优于DSYCD。

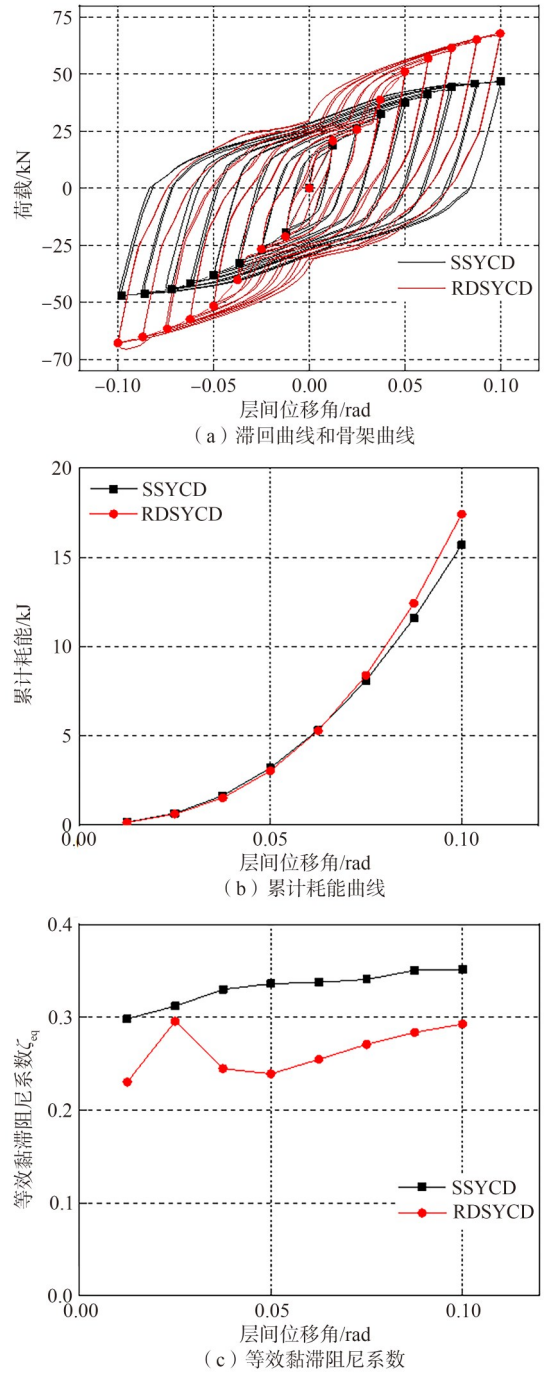


图19 SSYCD及RDSYCD的主要指标曲线

Fig. 19 Main index curves of SSYCD and RDSYCD

由此可见，RDSYCD通过UD和SSD的组合，不仅呈现出较为明显的双阶段工作机制，而且因为外层设置的SSD，改善了DSYCD在一阶工作阶段初始刚度较低的问题，还能够提升部件的极限承载力和耗能能力。

4 结 论

针对目前金属阻尼器存在的构造复杂、分阶段效果不显著及应用成本高问题，通过U型阻尼器和狭缝钢板阻尼器的嵌套组合，提出了3种构造形式不同的金属阻尼器。通过有限元模拟对这些金属阻尼器的抗震性能进行对比研究，主要分析了阻尼器的滞回曲线、骨架曲线、耗能量和等效黏滞阻尼系数，得到的主要结论如下：

1）与传统的UD相比，SSYCD可以在保证极限承载力相近的情况下，减少28.20%的用钢量并且使得初始刚度和耗能量分别增加150.16%和250.57%，充分证明了SSYCD抗震性能的优越。

2）DSYCD通过耗能单元的嵌套、滑动螺栓及长圆孔的设置，实现了第一、第二耗能单元的先后屈服耗能，阻尼器呈现出较为明显的双阶段屈服工作机制。但是DSYCD初始刚度及耗能量相较于SSYCD下降明显。

3）RDSYCD呈现出同DSYCD相似的双阶段屈服工作机制，并且在与SSYCD用钢量相同的前提下其初始刚度、极限承载力和总耗能量与SSYCD相比分别增加6.28%、44.55%及11.03%。

参 考 文 献

[1] 张爱林，刘廷勇，张艳霞，等. 基于智能建造的快速全装配大跨度预应力空间钢结构体系创新研究展望[J]. 北京工业大学学报，2020，46(6)：591-603.

[2] 张爱林. 工业化装配式高层钢结构体系创新、标准规范编制及产业化关键问题[J]. 工业建筑，2014，44(8)：1-6.

[3] 尚庆学，张锡朋，陈曦，等. 基于位移型阻尼器力学模型的消能减震设计方法[J]. 建筑结构学报，2022，43(7)：62-71.

[4] XU G，GUO T，LI A，et al. Seismic resilience enhancement for building structures：a comprehensive review and outlook [J]. Structures，2024，59：105738.

[5] ZHANG A，WANG H，JIANG Z，et al. Numerical simulation analysis of double yield points assembled buckling-restrained brace with replaceable inner core [J]. Structures，2022，35：1278-1294.

[6] ZHAI Z，LIU Y，GUO W，et al. A seismic resilient design method for structures equipped with two-level yielding dampers，accounting for extremely rare earthquakes[J]. Engineering Structures，2023，294：116797.

[7] LI Z，SHU G，HUANG Z. Development and cyclic testing of an innovative shear-bending combined metallic damper[J]. Journal of Constructional Steel Research，2019，158：28-40.

[8] CHEN Y，CHEN C，JIANG H，et al. Study of an innovative graded yield metal damper [J]. Journal of Constructional Steel Research，2019，160：240-254.

[9] 吴山，何浩祥，兰炳稷，等. 分级屈服型金属套管阻尼器减震理论与试验研究[J]. 工程力学，2022，39(7)：147-157.
[10] 种迅，宋磊，陈长林，等. 含减震外挂墙板装配式混凝土剪力墙结构抗震性能研究[J]. 工业建筑，2020，50(1)：40-46.
[11] JIANG Z，CHEN M，ZHANG L，et al. Seismic performance and design method of U-shaped damper with corrugated energy-consuming component[J]. Journal of Constructional Steel Research，2024，221：108882.
[12] 孔子昂，王涛，施唯. 带缝钢板阻尼器受力性能试验研究[J]. 土木工程学报，2015，48(9)：11-22.
[13] CHAN R W K，ALBERMANI F. Experimental study of steel slit damper for passive energy dissipation[J]. Engineering Structures，2008，30(4)：1058-1066.
[14] 朱柏洁，张令心，王涛. 轴力作用下剪切钢板阻尼器力学性能试验研究[J]. 工程力学，2018，35(增刊1)：140-144.
[15] 杜红凯，韩淼，闫维明，等. U型钢板力学性能受硬度和层数的影响分析[J]. 工程力学，2016，33(增刊1)：101-106.
[16] 杜红凯，韩淼，闫维明，等. 锰钢U形限位器承载力试验及弹塑性回归分析[J]. 建筑结构学报，2016，37(8)：108-114.