

浅谈狭缝阻尼器的发展与应用

信家全

中国中元国际工程有限公司 北京 100089

【摘要】由于其良好的耗能性能，狭缝阻尼器装置（SSD装置）在工程上得到广泛引用，各国研究人员针对SSD装置进行了大量的试验和理论研究，并尝试对SSD中支撑的形式、形状进行改进，以进一步优化其工作性能。在地震过程中，狭缝阻尼器具有足够的延性，能够在结构体系中发挥塑性，可通过变形吸收大量的地震能量，减小对主体结构构件的损伤破坏，同时又具有一定的刚度，能够满足主体正常使用的设计要求。综上，阻尼器的耗能性能成为大家普遍研究的重点。

【关键词】狭缝阻尼器；耗能；刚度；抗震性能

近年来，建筑结构的抗震性能越来越受到重视。为了提高结构在遭遇地震等灾害时的安全性，学者们不断探索更有效的连接技术。其中，SSD无焊设计以其优越的性能，展现出巨大的应用潜力。为达到震后尽早实现建筑及受灾地区的正常使用的目标，国外 Wada. A于1992年首次将消能减震结构引入到抗震体系中，以降房屋震后维修和重建的成本。自从Notheridge大地震后，美国逐渐开始重视无源减震措施，特别是日本神户大地震后，更多的建筑物使用了带有减震装置的结构；这种阻尼器的基本工作机理是减少破坏和破坏。狭缝阻尼器（SSD）作为一种新一代的金属滞回阻尼器，通过实验研究和工程实践表明，该阻尼器在低周往复性能方面表现出了较好的抗冲击性能，而且能够较好地反映其低周反复性能。SSD作为一种新型的阻尼器形式，得到了越来越多的重视。

1996年，日本一栋26层高的住宅中首先提出了缝隙阻尼器（SSD）的概念，自此之后，这一类型的阻尼器得到了越来越多的关注。日本学者 Amadeo于1998年对狭缝阻尼器进行了研究，考察了其在剪应变占优状态下的能量耗散特性，并对其相关参数（如 B/H型、低碳钢、高强钢）、加载方式等进行了实验研究，最终得到对SSD耗能性能的理论计算方法。研究表明，SSD装置具有稳定的滞回性能、良好的耗能能力和延性，能够通过特殊的结构设计，将能量在循环荷载下通过空腹腹板构件的弯曲屈服而耗散，从而实现结构的抗震性能。Ricky W. K.通过9次试验验证了这一结论。韩国学者Sang-Hoon Oh等人对全尺寸SSD钢结构进行了深入研究。他们在循环加载试验中，将SSD钢结构和常规焊接抗弯矩框架试件进行对比分析。结果表明，采用SSD的梁柱节点连接的结构体系，同样展现出优秀的滞回性能，其耗能和塑性变形主要集中在狭缝阻尼器处。通过合理的结构设计，可以有效保护梁、柱等结构受力构件在弹性受

力状态下工作。日本学者 Hiroshi Tagawa研究了 SSD 应用于结构体系的循环特性，并针对其框架结构进行了理论推导和实验验证。Tagawa Hiroshi 在研究中首先推导了 SSD 应用于结构体系的侧移刚度和强度计算公式。该公式考虑了 SSD 的材料特性和几何形状，能够准确预测系统在不同加载条件下的力学响应。为了验证理论结果，Tagawa Hiroshi 设计并实施了往复加载试验，共计6次。试验结果显示，该系统在往复加载下表现出稳定的循环性能，并能够充分的吸收地震所产生的能量，有效减轻主体结构的损坏。这充分证明了 SSD 在工程实践中作为耗能构件，具有良好的塑性耗能能力，且有足够的有效性和可靠性。Amir Ahmad Hedayat 采用有限元分析方法，结合 Tagawa 研究中的参数，建立了 749 个 SSD 模型。他定义了 SSD 的 3 种形式和 5 个基本几何参数，并通过数值模拟分析，提出了 SSD 最优长细比的取值范围，以确保其在侧向荷载作用下不发生屈曲。这一研究成果为 SSD 的优化设计提供了重要参考。Hae-Yong Park在梁柱节点中布置了SSD，并进行了循环加载试验。通过分析试验结果，推导了梁系的刚度计算公式。研究发现，当SSD的设计强度低于梁的强度时，梁柱节点的连接转动行为引起的变形主要集中在SSD上。这是由于抗弯构件产生的弯矩梯度导致SSD承担了主要的能量吸收作用，从而充分发挥了SSD的耗能能力。为了提高狭缝阻尼器（SSD）在反复荷载下的耐用性和能量吸收能力，Babak Keykhosro Kiani 的研究人员提出了一种新方法。该方法结合了多目标形状优化算法和有限元迭代法。简单来说，就是利用计算机模拟软件 ABAQUS/Standard 对 SSD 的形状进行优化，以找到最优设计方案，让它能够更好地抵御反复荷载，同时又能最大程度地吸收能量。长安大学朱家旺基于有限元软件 ABAQUS，对安装不同形状 SSD 的梁柱节点进行了模拟分析，验证了 ABAQUS 在模拟节点和阻尼器工作性

能方面的准确性和可靠性。研究结果为 SSD 设计提供了重要参考, 根据该项研究成果, 能够对设计符合实际受力情况的SSD提供指导。然而, 该研究也存在一定的局限性, 由于在数值模拟计算过程中, 研究者设置钢材本构时选择了三折线本构, 将钢材的弹性阶段、强化阶段和屈服行为均定义为线性行为, 这种理想化的本构模型与材料实际的往复荷载力学性能存在相当的区别, 可能会对有限元模拟结果的准确性产生不好的影响。

在深入探讨狭缝阻尼器的性能时, 我们不难发现, 国内外的研究者们已经通过详尽的试验与理论探讨, 为该领域积累了宝贵的经验。这些研究不仅让我们对评估方法和数学公式有了较为一致的共识, 更为我们后续的研究提供了坚实的基础。如图1-1所示, 狭缝阻尼器的常规布置形式颇具特色。其构造原理类似于将一块长宽比极小的钢板进行切割, 形成数个微小的间隙。这样的设计, 使得它看起来就像是一个小型空腹桁架结构, 其中若干个撑杆起着关键作用。为了减轻应力集中, 支架的末端设计为圆形倒角, 这一细节处理无疑增强了其结构的稳定性和耐用性。基于变形假设, 我们进一步将支撑端部的复杂形态简化为直线, 而阻尼器底座的高刚度特性则使其可以视为刚性连接。这一简化处理, 如图1-2(a)所示, 为我们构建了一个适用于SSD性能分析的理想化计算模型。撑杆的计算长度通过公式 $H' = H + 2r^2/H_T$ 得出, 这一参数的确定, 为后续的分析提供了依据。狭缝阻尼器在剪切力作用下工作时, 支撑部分会弯曲变形。图1-2(b)和(c)分别展示了弯矩图和变形示意图。随着位移d的不断增大, 钢支撑所承受的荷载也随之增加。当位移达到一定程度时, 钢支撑材料的屈服强度会被超过, 开始进入塑性变形阶段。此时, 钢支撑的截面会发生永久性变形, 并在两端逐渐形成塑性铰。塑性铰的形成标志着钢支撑的承载能力已经达到极限, 其刚度也大幅下降。狭缝阻尼器的力学特性可用支撑计算长度 H'

、支撑宽度 B 、和SSD厚度 t 来描述。为了简化分析, 将全截面屈服假定应用于支撑部分, 即认为支撑部分在屈服时整个截面都达到了屈服强度, 屈服荷载 P_y 可以根据塑性机理分析确定。

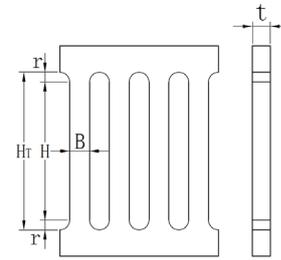


图1-1 SSD基本形式

SSD装置支撑的惯性矩为:

$$I = tB^3 / 12 \quad (1-1)$$

弹性刚度是用来描述材料或结构抵抗变形的能力的指标。它定义为施加在结构上的力与结构产生的变形之间的比例。将单位位移施加于支撑两端, 对应弹性刚度为:

$$k_d = cn \frac{12EI}{H^3} = cn \frac{EtB^3}{H^3} \quad (1-2)$$

其中, c 为SSD装置的刚度参数, 用以衡量支撑固定端刚度; n 为SSD装置撑杆的数量; 支撑厚度、支撑宽度分别表示为 t 和 b 。

在结构力学中, 构件在极限受力条件下, 当其材料达到屈服强度并继续承受外力时, 会发生塑性变形, 最终在某些关键位置形成塑性铰。当位移水平较大时, 作用在支撑条带两端的弯矩使边缘处应力达到屈服应力值, 在转角达到 θ_p 时, 在支撑条两端形成塑性铰。对于矩形截面梁, 全截面屈服状态下的塑性弯矩为:

$$M_p = \sigma_y \frac{tB^3}{4} \quad (1-3)$$

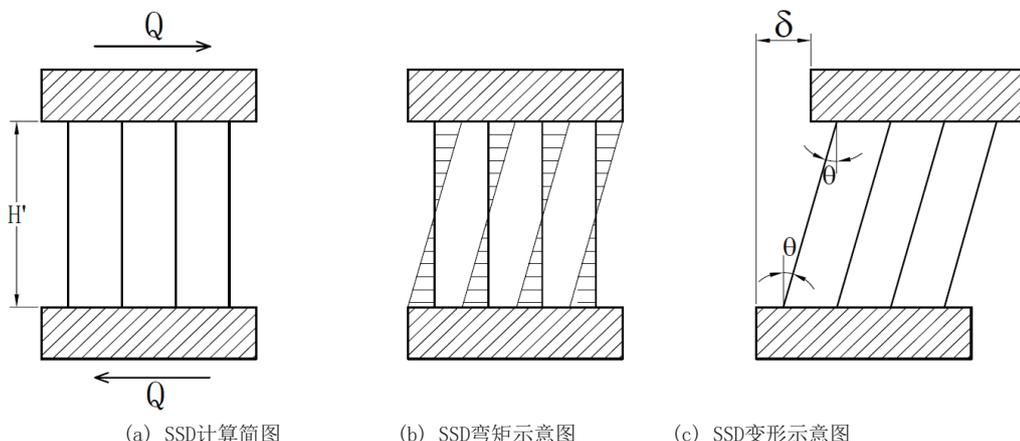


图1-2

塑性铰的形成意味着构件的承载能力已达到极限，进一步加载将导致结构失稳。根据全截面塑性假定采用能量法计算，有：

$$P_y \delta_p = 2nM_p \theta_p \quad (1-4)$$

如图1-2所示，塑性阶段SSD的位移 δ_p 与塑性转角 θ_p 存在一定的几何关系，可以表达为下式：

$$\delta_p = H' \tan \theta_p \quad (1-5)$$

在小位移条件下，在小位移条件下可以认为 $\tan \theta_p \approx \theta_p$ ，认为 $\tan \theta_p \approx \theta_p$ ，则式1-5可简化为：

$$\delta_p = H' \theta_p \quad (1-6)$$

将式1-4、1-5代入1-6中，SSD支撑的数量参数表示为 n ，构成SSD的材料屈服强度表示为 σ_y 。

从而得到SSD支撑在弯矩作用下的屈服荷载及名义屈服位移分别为：

$$P_{y,m} = \frac{2nM_p}{H'} = \frac{n\sigma_y t B^2}{2H'} \quad (1-7)$$

$$\delta_y = 0.5 \varepsilon_y H'^2 / B \quad (1-8)$$

当支撑的宽长比 B/H' 较小时，支撑条会呈现短柱形式。这种情况下，其受力破坏模式会发生改变，与传统的长柱不同，短柱的破坏模式不再以弯曲破坏为主。由于短柱截面尺寸较小，其抗弯能力相对较弱，而抗剪能力则相对较强。因此，在两端弯矩达到屈服弯矩之前，截面的剪切破坏就可能发生。因此，必须充分考虑其剪切破坏的可能性。

假设支撑条在弹性变形范围内，平均剪应力与最大剪应力的比例为 $2/3$ ，钢材抗剪强度与抗拉强度的比例为 $1/\sqrt{3}$ 。基于以上假设，我们可以推导出支撑条以剪切变形为主时对应的屈服荷载。

$$P_{y,s} = \frac{2n\sigma_y t B}{3\sqrt{3}} \quad (1-9)$$

在SSD屈服过程中，剪切变形和弯曲变形都可能发生。为了准确地确定SSD的屈服荷载，需要考虑这两种变形的影响。由于剪切变形和弯曲变形通常会导致不同的屈服强度，因此应选择两者中较小的值作为SSD的屈服荷载

$$P_y = \min \{ P_{y,m}, P_{y,s} \} = \min \left\{ \frac{n\sigma_y t B^2}{2H'}, \frac{2n\sigma_y t B}{3\sqrt{3}} \right\} \quad (1-10)$$

显然SSD的屈服位移 δ_y 是由两部分构成的，可以表示为：

$$\delta_y = \delta_{yb} + \delta_{ys} = \frac{Q_y (H')^3}{nEtB^3} \left(1 + 3 \ln \frac{H_T}{H'} \right) + \frac{3Q_y H'}{2ntBG} \left(1 + \ln \frac{H_T}{H'} \right) \quad (1-11)$$

由于弯曲变形和剪切变形所引起的位移分别表示为 δ_{yb} 和 δ_{ys} 分， E 为弹性模量， G 为剪切模量， H_T 为支撑长度。

由下式：

$$\left(\frac{H'}{H} \right) \left[1 + 3 \ln \left(\frac{H_T}{H'} \right) \right] \approx (1.5 + 3r/H)$$

$$\left(\frac{H'}{H} \right) \left[1 + \ln \left(\frac{H_T}{H'} \right) \right] \approx (1 + 2r/H)$$

$$E = G(1 + 2\nu)$$

根据等式1-11，狭缝阻尼器屈服位移 δ_y 可以通过下式计算得到：

$$\delta_y = \frac{1.5P_y H_T}{nEtB} \left[\left(\frac{H'}{B} \right)^2 + 2.6 \right] \quad (1-12)$$

以上便是以上便是狭缝阻尼器屈服荷载及屈服位移的推导过程。在实际工程应用中，我们可以根据上述结论，结合有限元分析以及结构力学试验的结果，合理设计狭缝阻尼器，使其能够在满足结构安全性的前提下，有效地控制结构的振动幅度，提高结构的抗震性能

结论：

本文简要论述了狭缝钢板阻尼器SSD在结构中的应用和发展，介绍了国内外学者的理论、模拟和实验研究及成果，分析了缝隙阻尼器的受力模式，得到了计算假定，推导出缝隙阻尼器力学性能的计算公式。未来，对SSD的研究需要更加深入，主要方向包括：

1) 改进阻尼器材料模型：采用更精确的材料模型，如多线性模型或Chaboche本构模型等，以更准确地模拟钢材在循环荷载下的力学行为。

2) 考虑阻尼器与结构相互作用：将SSD与结构整体作为一个系统进行分析，考虑阻尼器与结构之间的相互作用，更准确地预测结构的抗震性能。

3) 探索新型SSD形状：研究不同形状SSD的力学性能，寻找更加高效和经济的SSD形状。

相信随着研究的不断深入，SSD将在结构抗震领域发挥更加重要的作用。

总之，对狭缝阻尼器屈服荷载及屈服位移的深入研究，有利于我们更合理地设计和应用狭缝阻尼器，提高结构的抗震性能，保障人民生命财产安全。

参考文献：

- [1] 信家全. G20Mn5QT铸钢狭缝阻尼器选型优化研究[D]. 天津大学, 2024
- [2] Sang-Hoon Oh, Young-Ju Kim, Hong-Sik Ryu. Seismic performance of steel structures with slit dampers[J]. Engineering Structures. 2009, 31(9):1997-2008.