

包含可更换耗能钢板的自复位支撑参数分析

刘家旺, 邱灿星, 杜修力
(北京工业大学建筑工程学院, 北京 100124)

摘要: 为了提高结构的抗震韧性,减小结构的震后残余变形是一种有效途径. 研究了一种包含可更换耗能钢板 (energy absorbing steel plate, EASP) 的自复位支撑 (self-centering brace, SCB), 对 SCB 进行了数值模拟研究, 建立有限元模型并进行验证, 以此为基础对 SCB 进行了参数分析, 探讨关键参数的改变对 SCB 滞回性能的影响. 结果表明: 增大 EASP 的屈服强度可以提高 SCB 的承载力, 但是增大了残余变形, 同时使得 SCB 在位移较小的情况下难以产生耗能能力; 减小钢绞线预应力会导致 SCB 残余变形增大; 缩短钢绞线长度会提高 SCB 刚度和承载力. 为了增强 SCB 的耗能能力和自复位性能, 在实际设计中, 建议采用较低屈服强度的 EASP, 同时在满足 SCB 变形需求的前提下, 对钢绞线施加较大的预应力.

关键词: 自复位; 滞回性能; 耗能; 数值模拟; 参数分析; 残余变形

中图分类号: TU 325.1

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2021)04-0374-09

doi: 10.11936/bjutxb2020110039

Parametric Study of a Self-centering Brace Utilizing Energy Absorbing Steel Plate Clusters

LIU Jiawang, QIU Canxing, DU Xiuli

(College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: Reducing the residual deformation of structures after earthquakes is an effective way to achieving high resilience. In this paper, the self-centering brace (SCB) equipped with several energy absorbing steel plate (EASP) clusters was investigated and a finite element model of SCB was established and verified. A parametric study was carried out to investigate the influence of different parameters on the hysteretic response of the SCB. Results show that the EASP with higher yield strength leads to higher strength of the SCB and larger residual deformation. Besides, the energy dissipation capacity is diminished at small displacement, the residual deformation increases noticeably when the post-tensioned force is low, and the stiffness and strength of SCB increase with shortening steel strands. Low strength steel is recommended for EASPs and sufficient post-tensioned force should be applied to the premise of the displacement demand of SCB for a favorable energy dissipation and self-centering capacity.

Key words: self-centering; hysteretic behavior; energy dissipation; numerical simulation; parametric study; residual deformation

结构的抗震韧性不仅体现在防止整体倒塌,而且反映在保障震后功能^[1]. 这要求阻尼器在控制峰

收稿日期: 2020-11-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51808317)

作者简介: 刘家旺(1996—), 男, 博士研究生, 主要从事地震工程、结构振动控制方面的研究, E-mail: 18811044515@163.com

通信作者: 邱灿星(1987—), 男, 教授, 主要从事地震工程、结构振动控制方面的研究, E-mail: qiucanxing@bjut.edu.cn

值响应的同时还能够减小甚至消除残余变形。然而,传统阻尼器难以同时满足上述2项要求。由于兼具自复位(self-centering, SC)能力和耗能能力,自复位装置及其相应的结构体系在过去数十年中受到了广泛关注^[2-7],其抗震优越性得到了试验测试和数值模拟的双重验证^[8-16]。Ricles等^[3]提出了采用预应力筋的自复位钢框架。Qiu等^[8]利用形状记忆合金(energy absorbing steel plate, SMA)的超弹性能力设计了装配有SMA支撑的钢框架,并进行了振动台试验和数值模拟,验证了其优越性能。刘璐等^[9]提出了一种自复位防屈曲支撑,通过预应力筋实现复位,拟静力试验结果显示其具有良好自复位性能。郭彤等^[10]提出了一种腹板摩擦式自定心预应力混凝土框架梁柱节点,具有优秀的抗震性能。钱辉等^[11]将SMA筋与超高韧性纤维增强水泥基复合材料混合使用,显著提高了混凝土节点的延性和自复位能力。

根据工作机理,自复位装置通常由复位元件和耗能元件组成。常见的耗能元件包括摩擦阻尼器^[17]、金属阻尼器^[18]和黏滞阻尼器^[19]等。近期,一种含有耗能钢板(energy absorbing steel plate, EASP)的阻尼器被提出^[20],试验结果显示其具有稳定和饱满的滞回行为,便于安装和震后更换。为利用EASP阻尼器的耗能能力的同时使支撑具备自复位性能,进一步提高结构抗震韧性,一种包含可更换EASP的自复位支撑(self-centering brace, SCB)被提出并进行了试验验证^[21]。SCB利用预应力钢绞线实现自复位性能,消除残余变形;利用EASP平面外的塑性弯曲实现对地震能量的耗散。需要指出的是,金属材料具有良好的面内剪切耗能性能^[22],这值得在以后的研究中进一步考虑。

在前期试验工作的基础上,为了更加深入了解不同参数的变化对SCB性能造成的具体影响,包括耗能能力、残余变形等,本文基于数值模拟技术对SCB开展了参数分析。关键参数包括:EASP屈服强度、钢绞线预应力和钢绞线长度。参数分析结果对SCB的实际设计具有借鉴意义。

1 SCB的构造与原理

本章将简要介绍SCB的基本构造及其工作原理,并结合理论公式说明其力学性能。详细的阐述可见文献^[21]。

1.1 基本构造

包含可更换EASP的SCB由耗能系统、自复位

系统和约束系统组成,如图1所示。耗能系统包含多组耗能单元、U形框筒和芯板。其中耗能单元由EASP、端板及带轨槽的角钢组成,具体构造如图2所示。耗能单元的一侧端板与U形框筒螺栓连接,另一侧端板与芯板螺栓连接。自复位系统包含预应力钢绞线、端板、限位板和驱动板,限位板焊接在U形框筒内,驱动板焊接在芯板两侧并与端板接触,钢绞线两端均固定在端板上,两端板分别被U形框筒和限位板抵住,使预应力可以施加在钢绞线上。约束系统包含多组中间开槽的横隔板,并与U形框筒螺栓连接,目的是增加SCB的整体稳定,同时防止芯板平面外失稳。芯板、U形框筒与水平连接板连接处均设有加劲板,防止局部失稳。图1(d)展示了装配完成后的自复位支撑。

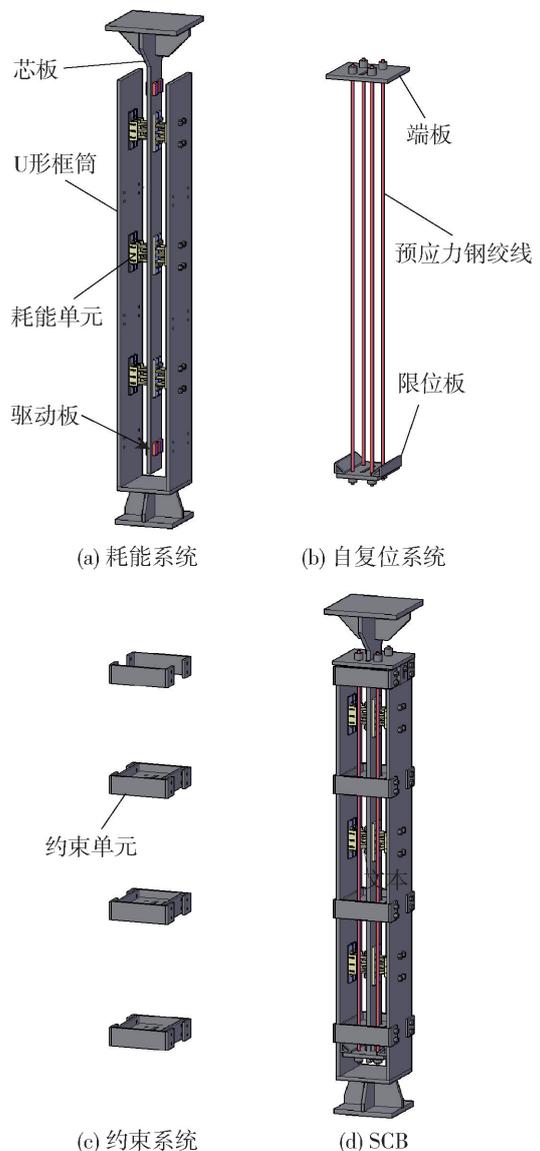


图1 SCB构造^[21]

Fig. 1 Configuration of the SCB^[21]

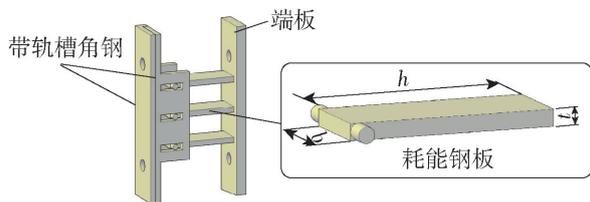


图2 耗能单元构造

Fig. 2 Configuration of the damping element

1.2 工作原理

当支撑由于地震作用受拉或受压时,芯板与U形框筒将产生纵向相对位移,此时,由于耗能单元的两端分别固定在芯板与U形框筒上,耗能单元的两侧端板也将发生纵向相对位移,从而引起EASP发生平面外弯曲并以此耗散地震能量。同时,发生相对位移的芯板带动驱动板将自复位系统的一侧端板顶起,而另一侧端板继续被抵住,使得预应力钢绞线伸长,如图3所示。当支撑外荷载卸除时,处于弹性阶段的预应力钢绞线提供恢复力,将已经屈服的EASP带回原位置,从而消除支撑由于EASP屈服产生的残余变形,实现支撑的自复位。SCB处于受拉和受压2种情况下,钢绞线和EASP的变形模式是对称的,这使得SCB具有拉压对称的力学行为。通过合理设计,可以把SCB的

塑性损伤部分集中于耗能单元中,SCB仅通过EASP屈服耗能。因为耗能单元两侧端板均为螺栓连接,且SCB具有敞开的外观,所以震后出现损伤的耗能单元非常便于更换安装。试验中,SCB试件两端的水平端板是为了与加载系统的加载头进行连接。在实际工程中,SCB的两端,即芯板和U形框筒外都设有水平连接板,便于安装应用于结构中。

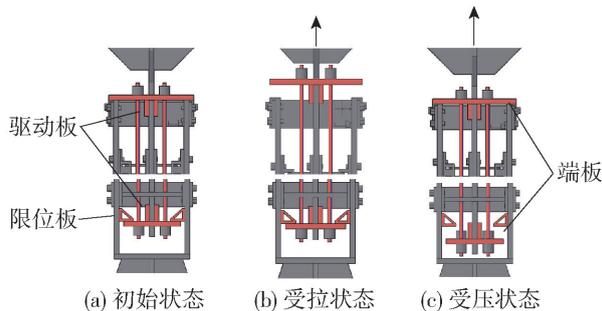


图3 SCB变形过程

Fig. 3 Deformation process of the SCB

1.3 力学性能

SCB的力学行为本质上是耗能系统与自复位系统二者力学行为的叠加。图4展示了SCB的简化力学行为。

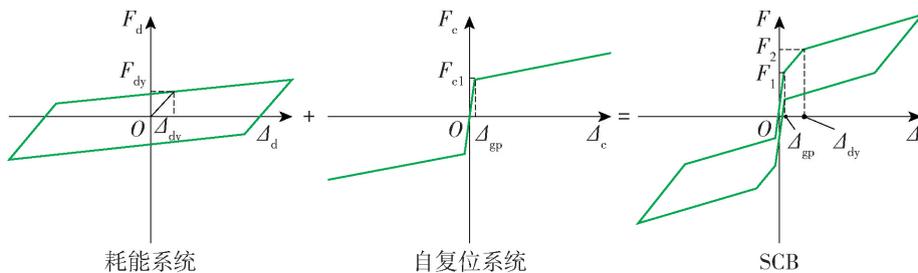


图4 SCB简化力学行为

Fig. 4 Simplified hysteretic curve of the SCB

耗能系统的力学性能由EASP决定,其力学模型可简化为悬臂,其初始刚度 K_{dy} 、屈服强度 F_{dy} 、屈服位移 Δ_{dy} 及屈服后刚度 K_{de} 可基于弹性理论进行计算^[20]。

自复位系统的力学性能取决于预应力钢绞线的数量、截面积、材性和预应力大小。当荷载超过钢绞线预应力时,自复位系统的一侧端板会脱开,脱开力 F_{cl} 和脱开位移 Δ_{gp} 分别为

$$F_{cl} = N_c P \quad (1)$$

$$\Delta_{gp} = \frac{F_{cl}}{K_{pe}} \quad (2)$$

式中: N_c 为钢绞线数量; P 为预应力大小; K_{pe} 为芯板

的刚度。对于自复位系统,端板脱开后的力-位移关系为

$$F_c = N_c P + N_c K_c (\Delta - \Delta_{gp}), \quad \Delta > \Delta_{gp} \quad (3)$$

$$K_c = \frac{E_c A_c}{L_c} \quad (4)$$

式中 E_c 、 A_c 和 L_c 分别为钢绞线的弹性模量、截面积和长度。

将耗能系统与自复位系统叠加,SCB的脱开荷载为

$$F_1 = F_{cl} + \Delta_{gp} K_{dy} \quad (5)$$

初始刚度为

$$K_1 = \frac{F_{cl}}{\Delta_{gp}} + K_{dy} \quad (6)$$

屈服强度及屈服前刚度

$$F_2 = F_{cl} + N_c K_c (\Delta_{dy} - \Delta_{gp}) + F_{dy} \quad (7)$$

$$K_2 = N_c K_c + K_{dy} \quad (8)$$

屈服后刚度

$$K_3 = N_c K_c + K_{de} \quad (9)$$

2 数值模拟

为了方便开展参数分析,首先对 SCB 进行数值模拟,建立有限元模型,并与试验结果进行对比验证。

2.1 建立模型

采用有限元软件 ABAQUS^[23] 建立了 SCB 的实体单元有限元模型。SCB 试件如图 5 所示,其中图 5 (a) 为试验中 SCB 试件照片,图 5 (b) 为 SCB 试件的有限元模型。除限位板外,SCB 的所有构件均采用 C3D8R 单元模拟。由于限位板特殊的几何构造,采用 C3D10M 单元模拟。为了节约计算时间的同时保证数值模拟结果的精确,对影响 SCB 力学性能的关键构件如 EASP、钢绞线等划分精细的单元网格,对其他构件如 U 形框筒、约束单元等划分较为粗糙的单元网格。不同构件之间的接触面也需要划分精细的单元网格以保证计算的收敛。对于接触面的模拟,设置了面与面接触,法向接触行为设置为“硬接触”,切向接触行为设置罚函数以模拟摩擦,摩擦因数取为 0.2^[24]。所有的焊接部分均以绑定连接模

拟。试件的材料本构参数设置为与试验一致,SCB 整体高度为 3 328 mm,横截面长、宽均为 500 mm。其中钢绞线的规格为 1×7,公称直径为 11.1 mm,有效变形长度为 2 624 mm,每根钢绞线施加 15 kN 预紧力,试件具体参数见表 1。数值模拟中的加载过程分为 2 步,在第 1 个分析步中采用降温法对钢绞线施加预应力。预应力施加完毕后,在第 2 个分析步中对 SCB 施加位移荷载。位移幅值从 ±1 mm 逐级增至 ±8 mm,每级增幅为 1 mm,各幅值循环加载 1 圈。为了避免应力集中,在 SCB 芯板的加载端设置参考点,之后将参考点与芯板的加载端耦合,将位移荷载施加在参考点上。



(a) 试验照片



(b) 有限元模型

图 5 试验与模拟中的 SCB^[21]

Fig. 5 SCB in test and simulation^[21]

表 1 试件参数表^[21]

Table 1 Design parameters of the specimens^[21]

EASP 参数							预应力钢绞线参数					
b/ mm	h/ mm	t/ mm	EASP 总数	屈服点/ MPa	极限强 度/MPa	屈强比	强化起点 应变	截面积/ mm ²	强度等 级/MPa	极限强 度/kN	屈服荷 载/kN	伸长率/ %
40	100	8	36	305.84	480.93	0.64	0.011 3	74.2	1 860	138	117	3.5

2.2 验证模型

图 6 为数值模拟结果与试验结果的对比图。可以发现二者吻合良好,误差主要出现在初始刚度和残余变形。这是因为在实际情况中,SCB 的各构件之间存在一些缝隙,同时各接触面也不是理想的平面,这些因素未能在有限元模型内考虑。SCB 滞回行为的力学特征可以被有限元模型较为准确地反映,且在数值模拟中各构件的变形状况

与实际情况一致,例如,图 7 展示了数值模拟中 EASP 的变形情况,具有和试验一致的变形模式^[21],这进一步说明了有限元模型的正确性。此外,用理论公式算得的力-位移曲线也在图 6 中画出,发现有限元模拟结果与其吻合良好。所以,该有限元模型的正确性得到了验证,能够以此为基础开展进一步的参数分析。

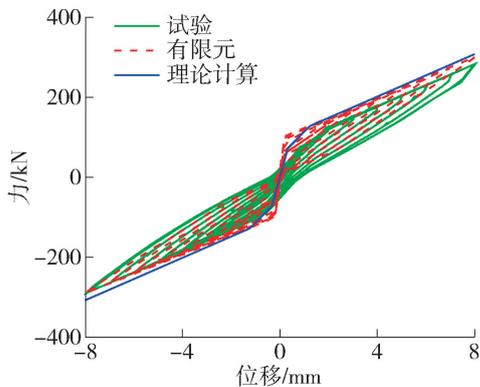


图6 试验与有限元结果对比

Fig. 6 Comparison of the results obtained from test and FE model

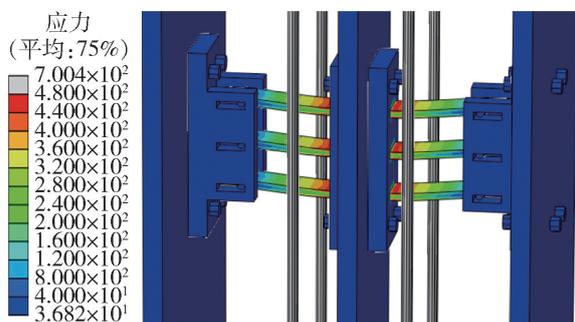


图7 有限元 EASP 变形模式

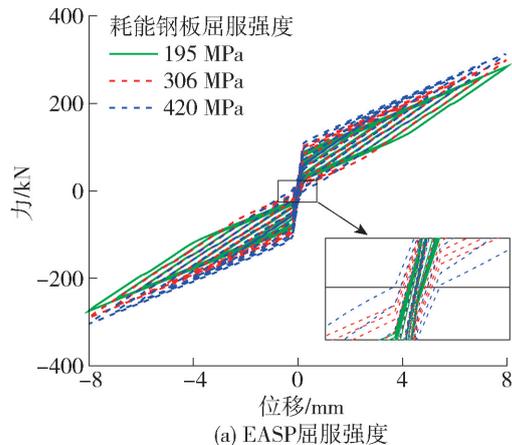
Fig. 7 Deformation mode of EASP from FE model

3 参数分析

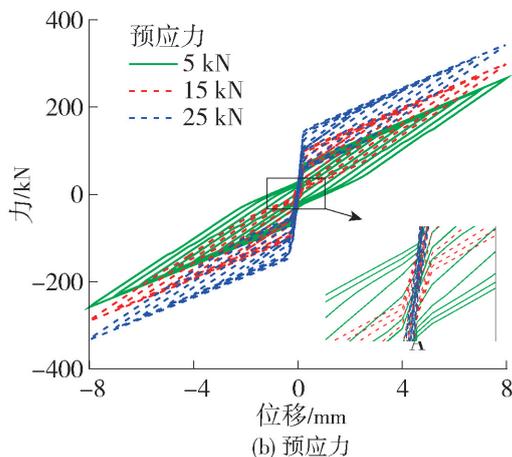
基于验证过的有限元模型开展参数分析,探讨参数变化对 SCB 滞回性能的影响. 关键参数包括: EASP 屈服强度、钢绞线预应力和钢绞线长度.

3.1 EASP 屈服强度

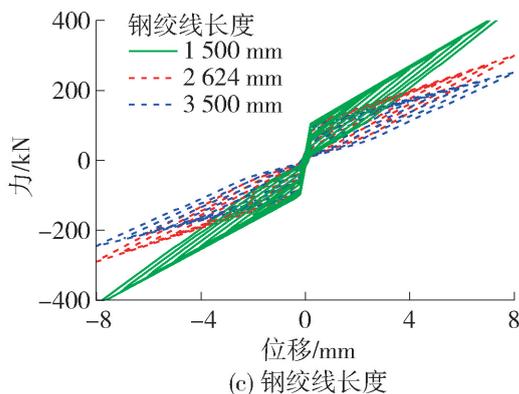
为检验 EASP 屈服强度对 SCB 滞回性能的影响,以 SCB 试验试件(EASP 屈服强度为 306 MPa)为原型,将其 EASP 屈服强度分别改变为 195、420 MPa,并进行计算. 滞回曲线对比结果如图 8(a)所示. 为了便于观察比较各模型的残余变形,将其局部放大. 由式(7)可知,提高 EASP 屈服强度将增大 SCB 的屈服强度,这提高了 SCB 的承载力;当 EASP 屈服强度分别为 195、306 和 420 MPa 时,SCB 到达最大位移时的承载力分别为 284.5、299.9 和 314.3 kN. 图 9 比较了位移幅值为 2 mm 时各模型的单圈滞回曲线,可以清楚地发现,由于此时的位移较小,只有 EASP 屈服强度为 195 MPa 的模型进入了屈服耗能阶段;而另外 2 个模型的滞回曲线呈折线形,不含有面积即意味着没有耗能能力,说明耗能单元



(a) EASP 屈服强度



(b) 预应力



(c) 钢绞线长度

图8 参数分析各模型滞回曲线

Fig. 8 Hysteresis curves of all the models for the parametric study

仍处于弹性阶段. 可以得知,EASP 屈服强度越高,SCB 进入耗能阶段所需要的位移越大. 图 10(a)对比了各模型单圈耗散能量大小. 可以发现,当位移较小(1~5 mm)时,屈服强度越低,SCB 单圈耗散能量越多,而当位移较大(5~8 mm)时,屈服强度越高,SCB 单圈耗散能量越多. 这是因为较低屈服强度的 EASP 会更早进入屈服耗能阶段,而当位移较大时,高屈服强度的 EASP 也已经充分进入了屈服

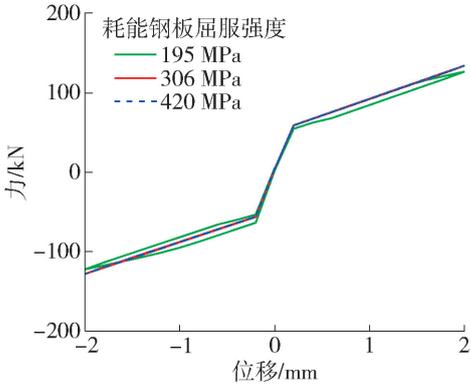
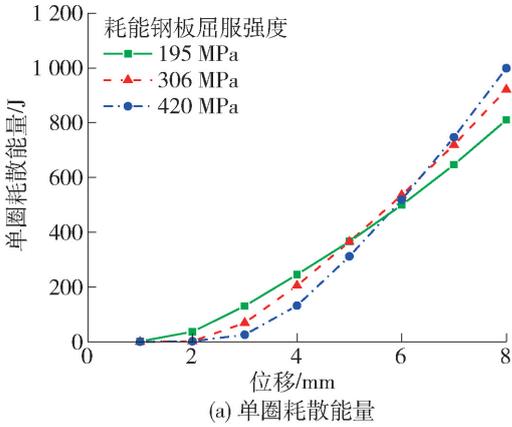
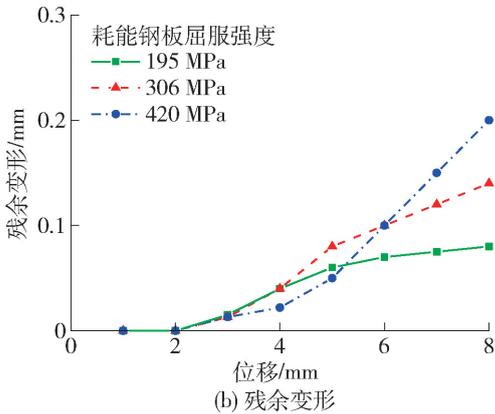


图9 不同 EASP 屈服强度模型位移为 2 mm 时的单圈滞回曲线

Fig. 9 Comparison of the single cycle curves (2 mm)



(a) 单圈耗散能量



(b) 残余变形

图10 EASP 屈服强度的影响

Fig. 10 Effect of yield strength of EASP

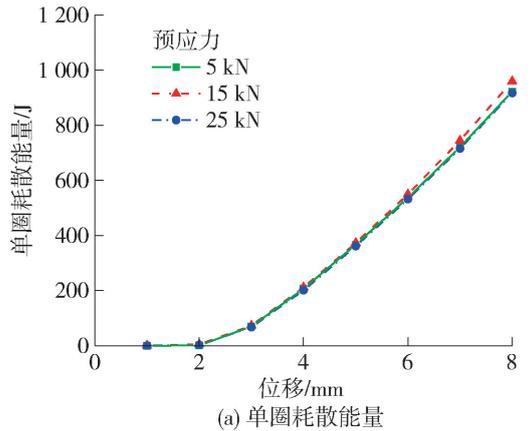
状态,而高屈服强度意味着屈服后产生变形所需要的力更大,这就导致了位移较大时,EASP 的屈服强度越高,单圈耗散能量越多.图 10(b) 比较了各模型的残余变形.可以发现,EASP 屈服强度越小,SCB 残余变形越小,自复位性能越好,这同样是因为高屈服强度 EASP 需要更大的恢复力才能消除残余变形.

综上所述,采用高屈服强度 EASP 的 SCB 承载力较大,且其处于较大位移时单圈耗散能量更多,但只有位移较大时才会进入屈服耗能阶段,这显然不利于结构遭遇较小强度地震的情况.同时,采用高强 EASP 的 SCB 自复位性能较差,存在更大的残余变形.综合考虑 SCB 的自复位性能和耗能能力,推荐采用低屈服强度 EASP.

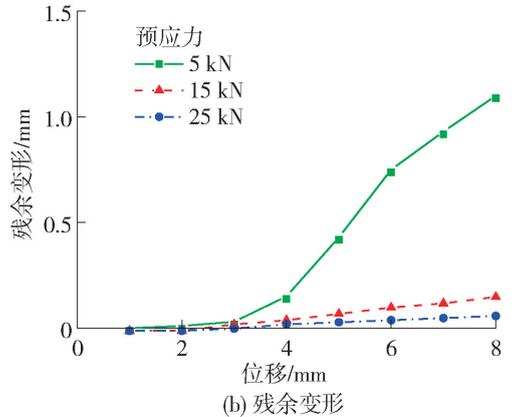
3.2 钢绞线预应力

SCB 的自复位能力是靠预应力钢绞线提供的恢复力来实现的,恢复力由两部分组成,即预应力和钢绞线随端板的伸长而引起的弹力.所以,预应力是影响 SCB 滞回性能的重要参数.为检测其影响,以 SCB 试验试件(预应力为 15 kN)为原型,将其预应力分别改变为 5、25 kN,并进行计算.

滞回曲线对比结果如图 8(b) 所示.可以发现,预应力越大,SCB 的脱开力越大,这与式(5)所反映的情况一致.此外,如式(6)~(9)所示,SCB 各阶段刚度也随预应力的增大而增大.这些也导致了 SCB 的承载力随预应力的增大而增大.但是,改变预应力大小并不会对 SCB 的耗能能力产生影响,如



(a) 单圈耗散能量



(b) 残余变形

图11 预应力的影响

Fig. 11 Effect of prestress of strands

图 11(a) 所示. 例如, 当预应力大小为 5 kN 时, SCB 最大位移单圈滞回耗散能量为 0.923 kJ, 预应力大小为 25 kN 时, 该值为 0.917 kJ. 图 11(b) 比较了不同预应力大小的 SCB 的残余变形, 可以发现, 当预应力为 15、25 kN 时, SCB 的最大残余变形极小, 分别为 0.07 mm 和 0.16 mm, 而当预应力为 5 kN 时, SCB 的最大残余变形显著增大, 为 1.10 mm. 理由是过小的预应力使 SCB 的恢复力不足以将已经屈服进入塑性的 EASP 带回原位. 所以, 考虑到实际情况中不可避免的预应力损失问题, 为了增大恢复力, 使 SCB 具有良好的自复位性能, 需要对钢绞线施加较大预应力. 但值得注意的一点是, 预应力越大, 预应力钢绞线的变形能力就越小, 因为在整个加载过程中钢绞线始终需要处于弹性阶段, 而预应力越大, 预应力钢绞线距屈服点就越近, 剩余的“变形储备”就越小. 所以, 对 SCB 进行合理设计是必要的, 在 SCB 满足变形需求的前提下, 施加较大的预应力, 才能实现良好的性能.

3.3 钢绞线长度

为检验钢绞线长度对 SCB 滞回性能的影响, 以 SCB 试验试件(钢绞线长度为 2 624 mm)为原型, 将其钢绞线长度分别改变为 1 500、3 500 mm, 并进行计算. 图 8(c) 为滞回曲线对比图. 可以发现, 改变钢绞线长度, SCB 脱离力基本不变, 但钢绞线长度与 SCB 脱离后的刚度成反比, 缩短钢绞线长度使 SCB 脱离后的反力明显增大, 与式(7)和式(9)一致. 根据图 12(a) 可以得知, 改变钢绞线的长度对 SCB 的耗能性能几乎没有影响. 这证明了 SCB 的力学性能是自复位系统和耗能系统二者的叠加, 因为改变钢绞线长度不会影响耗能系统, 所以 SCB 的耗能性能不会改变. 同时, 不同钢绞线长度对残余变形几乎没有影响, 如图 12(b) 所示, 3 个模型的残余变形都极小, 说明具有良好的自复位性能. 图 12(c) 对比了不同钢绞线长度 SCB 的钢绞线拉力, 可以发现, 当位移为 0 mm 时, 因为施加了相等的预应力, 各 SCB 的钢绞线拉力相同. 但随着位移绝对值的逐渐增大, 钢绞线越短, 钢绞线拉力增长得越快. 这是因为钢绞线的刚度与其长度成反比. 虽然采用较短的钢绞线会使 SCB 具有更大的承载力, 但这也减小 SCB 的变形能力, 因为同样的位移幅值, 钢绞线越短, 其应变就越大, 也就越接近屈服点. 综上所述, 钢绞线的长度需要合理选取, 以满足 SCB 的刚度需求和变形需求.

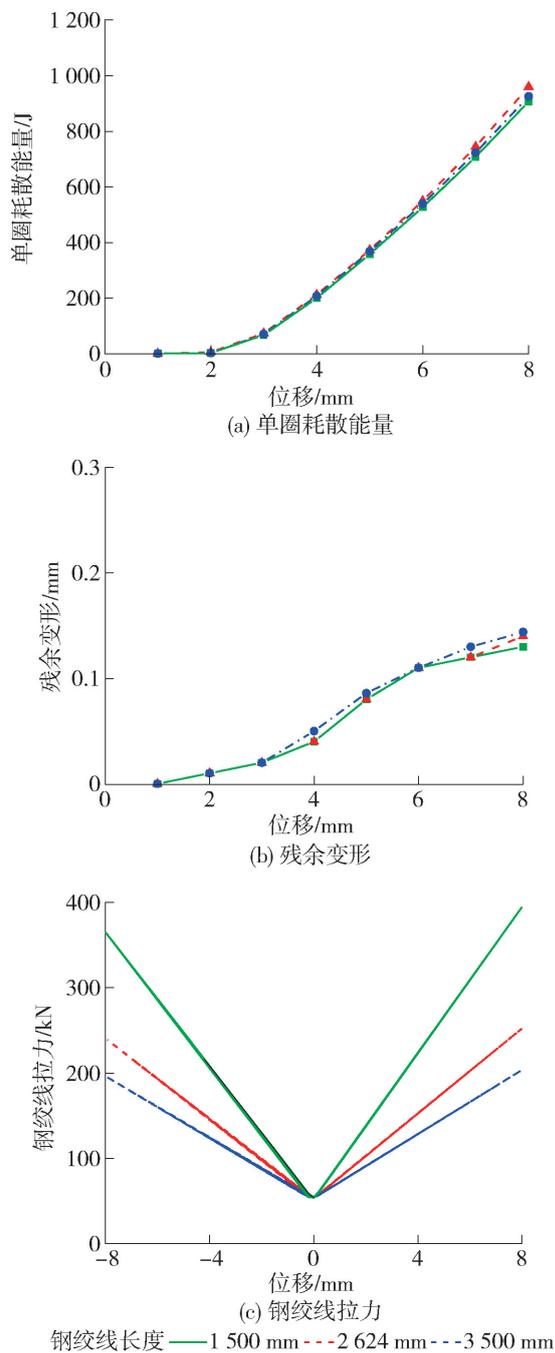


图 12 钢绞线长度的影响

Fig. 12 Effect of length of strands

4 结论

本文对包含可更换 EASP 的 SCB 进行了数值模拟研究, 并将有限元模型计算结果与试验进行对比, 验证了有限元模型的有效性, 之后以此为基础对 SCB 进行了参数分析, 探讨了关键参数的改变对 SCB 滞回性能的具体影响. 得出如下主要结论:

1) SCB 具有优异的自复位能力和一定的耗能能力, 可以用于提高结构抗震韧性, 减小结构残余

变形。

2) 为了保证 SCB 自复位性能,同时使其在受到较小位移时就开始耗能,建议采用较低屈服强度的 EASP。

3) 随着钢绞线预应力的减小,SCB 的残余变形将逐渐增大。在满足 SCB 变形需求的前提下,宜对钢绞线施加足够的预应力。

4) 缩短钢绞线长度会显著提高 SCB 的刚度和承载力,但减弱 SCB 的变形能力。因此,应结合实际需求合理设计。

参考文献:

- [1] BRUNEAU M, CHANG S E, EGUCHI R T, et al. A framework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities[J]. *Earthquake Spectra*, 2003, 19(4): 733-752.
- [2] PRIESTLEY M N, MACRAE G A. Seismic tests of precast beam-to-column joint subassemblages with unbonded tendons[J]. *PCI Journal*, 1996, 41(1), 64-81.
- [3] RICLES J M, SAUSE R, GARLOCK M, et al. Posttensioned seismic-resistant connections for steel frames [J]. *Structural Engineering*, 2001, 127(2), 113-121.
- [4] 张爱林, 叶全喜, 詹欣欣, 等. 具有复位功能的支撑研究综述[J]. *北京工业大学学报*, 2016, 42(9): 1338-1344.
ZHANG A L, YE Q X, ZHAN X X, et al. Review on brace with re-centering function [J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2016, 42(9): 1338-1344. (in Chinese)
- [5] FANG C, WANG W, FENG W K. Experimental and numerical studies on self-centering beam-to-column connections free from frame expansion [J]. *Engineering Structures*, 2019, 198: 109526.
- [6] 吕西林, 崔晔, 刘兢兢. 自复位钢筋混凝土框架结构振动台试验研究[J]. *建筑工程学报*, 2014, 35(1): 19-26.
LÜ X L, CUI Y, LIU J J. Shaking table test of a self-centering reinforced concrete frame [J]. *Journal of Building Structures*, 2014, 35(1): 19-26. (in Chinese)
- [7] 肖水晶, 徐龙河, 卢啸. 具有复位功能的钢筋混凝土剪力墙设计与性能研究[J]. *工程力学*, 2018, 35(8): 130-137.
XIAO S J, XU L H, LU X. Design and behavior study on reinforced concrete walls with self-centering capability[J]. *Engineering Mechanics*, 2018, 35(8): 130-137. (in Chinese)
- [8] QIU C X, ZHU S Y. Shake table test and numerical study of self-centering steel frame with SMA braces [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2017, 46(1): 117-137.
- [9] 刘璐, 吴斌, 李伟. 一种新型自复位防屈曲支撑的拟静力试验[J]. *东南大学学报*, 2015, 42(3): 536-541.
LIU L, WU B, LI W. Cyclic tests of novel self-centering buckling-restrained brace [J]. *Journal of Southeast University*, 2015, 42(3): 536-541. (in Chinese)
- [10] 郭彤, 宋良龙, 张国栋, 等. 腹板摩擦式自定心预应力混凝土框架梁柱节点的试验研究[J]. *土木工程学报*, 2012, 45(6): 23-32.
GUO T, SONG L L, ZHANG G D, et al. Experimental study on beam-column connections of self-centering prestressed concrete frame with web friction devices[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2012, 45(6): 23-32. (in Chinese)
- [11] 钱辉, 裴金召, 李宗翱, 等. 基于 SMA/ECC 的新型自复位框架节点抗震性能试验研究[J]. *土木工程学报*, 2020, 53(11): 64-74, 80.
QIAN H, PEI J Z, LI Z A, et al. Experimental study on seismic performance of self-centering beam-column joints reinforced with superelastic SMA and ECC [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2020, 53(11): 64-74, 80. (in Chinese)
- [12] QIU C X, DU X L. Seismic performance of multistory CBFs with novel recentering energy dissipative braces [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2020, 168: 105864.
- [13] QIU C X, ZHU S Y. Performance-based seismic design of self-centering steel frames with SMA-based braces [J]. *Engineering Structures*, 2017, 130: 67-82.
- [14] QIU C X, LIU J W, TENG J, et al. Seismic performance evaluation of multi-story CBFs equipped with SMA-friction damping braces [J/OL]. [2020-11-25]. <https://doi.org/10.1177/1045389X20987000>.
- [15] 张艳霞, 叶吉健, 杨凡, 等. 自复位钢框架结构抗震性能动力时程分析[J]. *土木工程学报*, 2015, 48(7): 30-40.
ZHANG Y X, YE J J, YANG F, et al. Seismic behavior time-history analysis of integral steel self-centering moment resisting frame [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2015, 48(7): 30-40. (in Chinese)
- [16] 蔡小宁, 孟少平, 孙巍巍. 自复位预制框架边节点抗震性能试验研究[J]. *土木工程学报*, 2012, 45(12): 29-37.
CAI X N, MENG S P, SUN W W. Experimental study on behaviors of beam-column connections for self-centering post-tensioned precast frame [J]. *China Civil*

- Engineering Journal, 2012, 45 (12): 29-37. (in Chinese)
- [17] 胡淑军, 顾琦, 姜俊, 等. 自复位 SMA 支撑的滞回性能与简化力学模型[J]. 建筑结构学报, 2020, 41(增刊1): 66-75.
HU S J, GU Q, JIANG J, et al. Hysteresis performance and simplified mechanical model of an innovative self-centering SMA brace [J]. Journal of Building Structures, 2020, 41(Suppl 1): 66-75. (in Chinese)
- [18] KAMPERIDIS V C, KARAVASILIS T L, VASDRAVELLIS G. Self-centering steel column base with metallic energy dissipation devices [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2018, 149: 14-30.
- [19] 赵祥, 刘忠华, 王杜良, 等. 形状记忆合金复合黏滞阻尼器设计及分析[J]. 地震工程与工程振动, 2016, 36(6): 72-78.
ZHAO X, LIU Z H, WANG D L, et al. Design and analysis of an innovative hybrid shape memory alloys viscous damper [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2016, 36 (6): 72-78. (in Chinese)
- [20] QIU C X, ZHANG Y C, QU B, et al. Cyclic testing of seismic dampers consisting of multiple energy absorbing steel plate clusters [J]. Engineering Structures, 2019, 183: 255-264.
- [21] 张邑尘. 震后可恢复功能的新型消能减震装置研究 [D]. 济南: 山东大学, 2019.
ZHANG Y C. Novel devices for seismic resistance and resilience of structures [D]. Jinan: Shandong University, 2019. (in Chinese)
- [22] WADA A, HUANG Y H, IWATA M. Passive damping technology for buildings in Japan [J]. Progress in Structural Engineering and Materials, 2000, 2(3): 335-350
- [23] ABAQUS. Analysis User's manual [M]. Providence: Dassault Systems Simulia Corp., 2014.
- [24] European Committee for Standardization. Eurocode 3: design of steel structures-part 1-8: design of Joints: EN 1993-1-8: 2005 [S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2005.

(责任编辑 张 蕾)

(上接第 373 页)

- [15] MANSOUR N, CHRISTOPOULOS C, TREMBLAY R. Experimental validation of replaceable shear links for eccentrically braced steel frames [J]. Journal of Structural Engineering, 2011, 137(10): 1141-1152.
- [16] 陈以一, 贺修樟. 配置可更换角钢连接构造的钢框架试验研究[J]. 钢结构, 2020, 35(8): 1-16.
CHEN Y Y, HE X Z. Test on moment resistant frame connection with replaceable angles [J]. Steel Construction, 2020, 35(8): 1-16. (in Chinese)
- [17] 王先铁, 林麟琿, 陈峰梅, 等. 外张拉式自复位方钢管混凝土柱脚的受力性能和设计方法研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2017, 49(6): 812-819.
WANG X T, LIN L H, CHEN F M, et al. Study on mechanical behavior and design method of external tension self-resetting concrete filled square steel tubular column foot [J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Sciences Edition), 2017, 49(6): 812-819. (in Chinese)
- [18] 刘阳, 郭子雄, 贾磊鹏, 等. 震损可更换组合柱抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2020, 41(7): 45-54.
LIU Y, GUO Z X, JIA L P, et al. Experimental study on seismic performance of innovative replaceable composite columns [J]. Journal of Building Structures, 2020, 41 (7): 45-54. (in Chinese)
- [19] FANG C, YAM C H, AUGUS C C, et al. Cyclic performance of extended end-plate connections equipped with shape memory alloy bolts [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2014, 94: 122-136.
- [20] 齐威. ABAQUS 6.14 超级学习手册 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2016: 31-176.
- [21] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢结构设计规范: GB50017 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2017.

(责任编辑 郑筱梅)