

DOI: 10.11918/j.issn.0367-6234.201703125

# 预应力索网抑制屈曲钢板剪力墙力学性能分析

曹正罡<sup>1,2</sup>, 吴鹏程<sup>1,2</sup>, 杜鹏<sup>1,2</sup>

(1.结构工程灾变与控制教育部重点实验室(哈尔滨工业大学), 哈尔滨 150090; 2.哈尔滨工业大学 土木工程学院, 哈尔滨 150090)

**摘要:**为解决薄钢板剪力墙受力上的缺陷,提出一种预应力索网抑制屈曲薄钢板剪力墙(CN-SPSW),它的工作原理为在钢板两侧交错布置预应力拉索,由拉索内预应力产生的回复力约束钢板面外变形.利用 ABAQUS 对单层单跨预应力索网抑制屈曲钢板剪力墙的抗剪性能进行数值模拟,分析在水平方向低周往复加载作用下,构件的抗剪性能及耗能能力.研究表明:索网为柔性约束,抑制较厚钢板的面外变形效果较弱,但对于大宽厚比的钢板剪力墙,预应力索网抑制构件的存在仍可显著减少钢板面外变形.针对宽厚比  $\lambda=1\ 000$  的 CN-SPSW,相较于同尺寸的钢板剪力墙,其峰值承载力提高 18%,耗能能力提高 47%.参数分析表明索网抑制构件宜用于宽厚比  $\lambda$  大于 600 的钢板剪力墙中.

**关键词:** 预应力索网; 抑制屈曲; 钢板剪力墙; 滞回性能; 耗能能力

**中图分类号:** TU391

**文献标志码:** A

**文章编号:** 0367-6234(2018)06-0184-08

## Mechanical properties of buckling restrained steel plate shear wall with prestressed cable nets

CAO Zhenggang<sup>1,2</sup>, WU Pengcheng<sup>1,2</sup>, DU Peng<sup>1,2</sup>

(1.Key Laboratory of Structures Dynamic Behavior and Control (Harbin Institute of Technology), Ministry of Education, Harbin 150090, China; 2.School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

**Abstract:** To optimize the mechanical performance of steel plate shear wall (SPSW), a novel buckling restrained steel plate shear wall (CN-SPSW) was proposed. In the CN-SPSW, prestressed cable nets were placed on the either side of infill panels to restraint the early buckling, and the out-of-plane deformation would be restricted by the panel's pre-tension. A non-linear finite element model was established via ABAQUS software package to study the hysteretic behavior of CN-SPSWs. The results show that the cable net is a kind of flexible buckling-restrained member, and it can reduce the out-of-plane deformation of infill panels significantly. Compared with the steel plate shear wall, peak bearing capacity and energy dissipation capacity of CN-SPSW are increased by 18% and 47% respectively with a width-to-thickness ratio of 1 000. Parameter analyses suggest that prestressed cable nets should be applied to SPSW whose width-to-thickness ratio is more than 600.

**Keywords:** prestressed cable nets; buckling restrained; steel plate shear wall; hysteretic property; energy-dissipating capacity

钢板剪力墙(SPSW)是一种新型抗侧力构件,它由内填钢板、水平边缘构件(梁或水平加劲肋)和竖向边缘构件(柱或竖向加劲肋)构成,具有较大的变形能力、良好的塑性性能等优点<sup>[1-2]</sup>.其按照内填钢板的宽厚比可分为薄钢板剪力墙( $\lambda \geq 250$ )和中厚钢板剪力墙( $\lambda < 250$ ).

非加劲薄钢板墙在承受水平荷载时,易发生剪切屈曲,产生屈曲噪声.当荷载正向作用时形成拉力带,反向作用时“拉力带”反向受压而发生屈曲,无法继续提供抗侧刚度,进而表现为耗能能力的降低.根据上述非加劲钢板剪力墙的诸多问题<sup>[3-4]</sup>,现有的主要解决方法之一是在钢板两侧添加抑制面外屈曲的构件.

首先,可在钢板两侧设加劲肋(如横纵加劲、交叉加劲等<sup>[5-8]</sup>),加劲肋将钢板表面分为若干小的区格,通过降低区格内钢板的宽厚比以达到提高钢板剪力墙剪切屈曲承载力的效果,但焊接产生的残余应力影响钢板的应力分布.近年来有学者提出了无黏结加劲钢板剪力墙<sup>[9-10]</sup>,其加劲肋和内填钢板间采用螺栓连接,并在加劲肋上开设椭圆孔;螺栓连接可有效避免焊接时产生的残余应力和变形,从而使得结构具有更好的延性和耗能能力.其次,Astaneh等<sup>[11]</sup>提出了一种采用预制钢筋混凝土板的组合剪力墙,但混凝土板会因参与抗侧而率先破坏,内填钢板则丧失了混凝土板提供的面外抑制作用,结构性能也随之降低.进而郭彦林等<sup>[12]</sup>又提出了一种防屈曲钢板剪力墙,其核心思想是进一步扩大混凝土板与周边框架间隙以及混凝土板上螺栓孔径,使混凝土板始终不与周边框架接触,仅作为约束钢板平面外变形的边界条件而存在,

收稿日期: 2017-03-24

基金项目: 国家自然科学基金(51378147)

作者简介: 曹正罡(1975—)男,博士,副教授

通信作者: 曹正罡, caozg@hit.edu.cn

使混凝土板不发生破坏,但防屈曲型钢板剪力墙利用混凝土板作为屈曲抑制构件,自重较大,装配运输困难.近几年丹麦学者采用轻质的 GFRP 纤维材料<sup>[13]</sup>贴于内填钢板上来提高钢板性能,但其面外约束效果弱,抑制屈曲的作用不明显.

综合考虑现有钢板剪力墙的优缺点,借鉴索网玻璃幕墙<sup>[14]</sup>中利用预应力提供面外刚度的这一作用,本文提出了一种预应力索网抑制屈曲钢板剪力墙,该型钢板剪力墙利用两侧预制的索网约束钢板面外变形,并可通过调节索网内的预应力来改变面外约束刚度的作用.

## 1 基本构造

预应力索网抑制屈曲钢板剪力墙(CN-SPSW)由索、索框、内填钢板及周边框架组成,见图 1.内填钢板与索网外框间通过穿透两者的螺栓连接,在索框上开螺栓放大孔,使索网可沿平行于板面滑动.索框与边缘构件之间留一定间隙,整个索网抑制构件不直接承受水平和竖向荷载.

横纵索交错处设索夹(图 2),两侧索夹分别设置扩大孔,用对拉螺栓连接,保证索网与内填钢板紧密贴合.在索夹约束下,索在此处可以相对滑动,以保证整根索受力均匀.

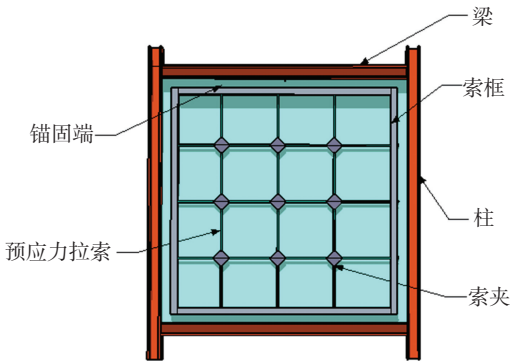


图 1 CN-SPSW 示意

Fig. 1 Buckling restrained steel plate shear wall with prestressed cable nets

## 2 有限元模型建立

### 2.1 基本假设

为着重研究钢板剪力墙构件内填钢板本身的力学性能及其随几何参数变化的影响,故作出如下假定:

1)梁、柱铰接,从而消除周边框架参与抗侧的影响;

2)钢板与周边框架采用刚性连接,排除非剪力墙破坏的失效模式并保证钢板剪力墙能充分发挥其性能;

3)梁、柱具有较大的抗弯刚度,为保证钢板剪力墙拉力带的充分发展,框架梁柱不先于钢板破坏.根据美国规范 FEMA450<sup>[15]</sup>和 ANSI/AISC341-10<sup>[16]</sup>,内填钢板平面主轴的截面惯性矩  $I_c$  满足下式要求:

$$I_c \geq \frac{0.003\ 07t_w h^4}{L} \quad (1)$$

式中: $t_w$ 为内填钢板厚度, $h$ 为水平边缘约束构件轴线间距, $L$ 为竖向边缘约束构件轴线间距.

### 2.2 关键建模技术

数值模型采用 ABAQUS 有限元软件模拟,如图 3所示.由于运输、加工以及安装等原因,钢板很难处于理想平整状态,表面存在一定的初始几何缺陷,缺陷的最大幅值按《钢结构工程施工质量验收规范》<sup>[17]</sup>要求取钢板宽度的 1/1 000,缺陷的分布形式采取薄钢板在侧力作用下的一阶屈曲模态.根据图 2 索夹处连接形式,有限元模型考虑了横纵索的相互搭接,纵索紧贴钢板,横索紧贴纵索外壁,索网抑制构件与钢板的连接处与钢板只耦合面外位移,从而使索网可沿平行于板面滑动;利用降温法为索施加预应力.加载方式为位移加载,加载曲线见图 4.

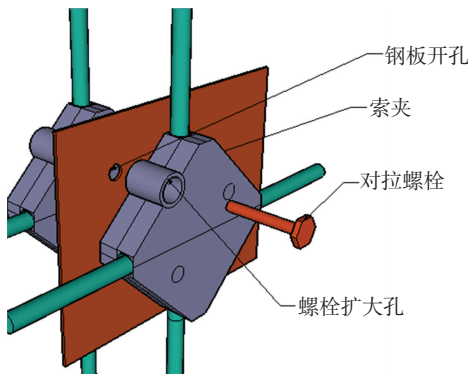


图 2 索夹详图

Fig.2 Detail of cable clamp

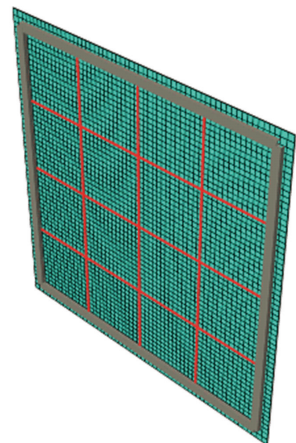


图 3 CN-SPSW 数值模型

Fig.3 Finite element models of CN-SPSW

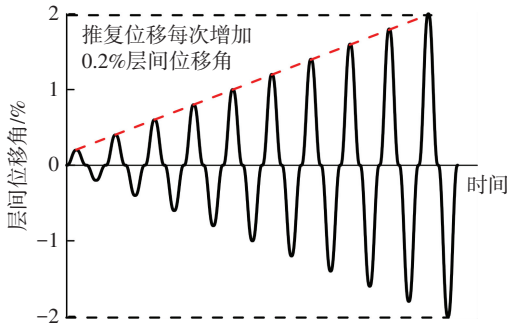


图 4 加载制度

Fig.4 Loading protocol

### 2.3 模型验证

由于该剪力墙为新型抗侧构件,尚未开展实验研究,为此根据试件 SPSW-500<sup>[18]</sup>(尺寸及参数见表 1),对非加劲薄钢板剪力墙的有限元模型进行验证,以考察上述建模方法的有效性。

数值分析采用位移加载控制,最大水平位移对应 4% 的层间位移角。如图 5(a) 所示,SPSW 有限元模拟的滞回曲线与 SPSW-500 的试验结果总体趋势吻合,有限元分析与试验曲线在加载刚度和卸载刚度方面比较一致,但试验曲线的正方向和反方向承载力较计算值偏小,误差接近 10%,原因是数值分析未模拟焊缝撕裂和连接螺栓的破坏。同时,利用上述方法针对 CN-SPSW 进行数值分析,索网采用纵横各布置 3 道索,单根索力值为 40 kN。滞回分析结果表明,CN-SPSW 耗能能力较 SPSW 有所提升,如图 5(b) 所示。因此,有必要针对这一新型钢板剪力墙进行系统的参数对比分析,以更好地了解其受力性能。

表 1 试件 SPSW-500 尺寸及材料参数

Tab.1 Detail of specimen SPSW-500

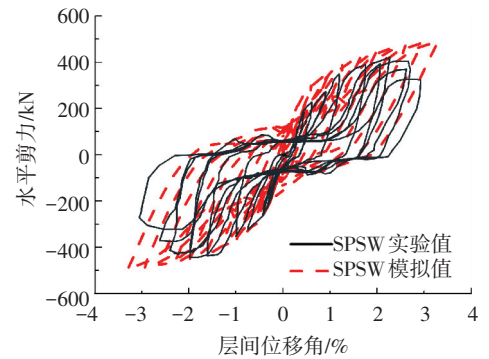
构件	尺寸/mm	屈服应力	屈服应变	弹性模量	极限应力	伸长
		$f_y/\text{MPa}$	$\varepsilon_y/10^{-6}$	$E/\text{GPa}$	$f_u/\text{MPa}$	率/%
钢板	1 100×1 100 ( $t=2.2$ )	474.1	207	202.8	514.3	29.6

## 3 CN-SPSW 与 SPSW 力学性能对比

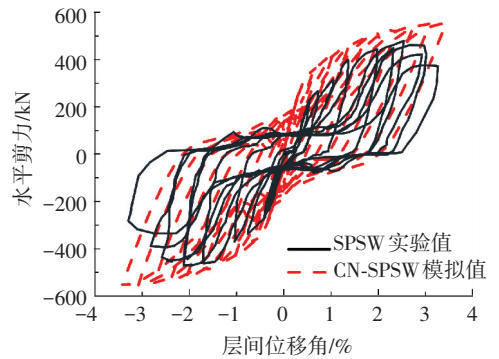
### 3.1 钢板变形模式

索网是一种柔性的抑制屈曲构件,对钢板的约束效果有限,故先选用宽厚比小( $\lambda = 1\ 000$ )的 CN-SPSW 进行分析,其中钢板尺寸为 3 m×3 m,下文模拟中钢板统一选取此尺寸。纵横各布置 5 道索。将 CN-SPSW 和 SPSW 逐步加载至 2% 层间位移角,面外位移对比如图 6 所示。对于 CN-SPSW,在层间位移角 0.2% 时,面外位移为 17 mm(薄板宽度的 5.7%);当加载至 2% 时,面外位移仍仅 35 mm(薄板宽度的 12%);而非加劲钢板墙在加载过程中面外

位移始终超过 50 mm(薄板宽度的 17%)。由此可见,索网抑制屈曲构件能够有效地减少钢板面外位移。



(a) SPSW 模拟值与实验值滞回曲线对比



(b) CN-SPSW 模拟值与 SPSW 实验值对比

图 5 模拟值与实验值滞回曲线对比

Fig.5 Comparison of simulated and tested hysteretic curves

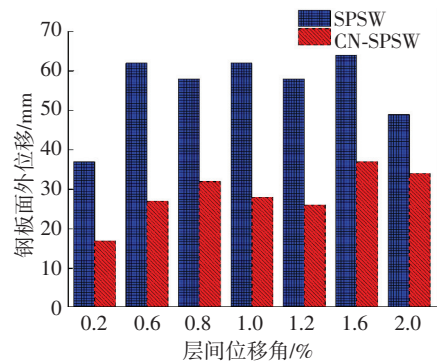
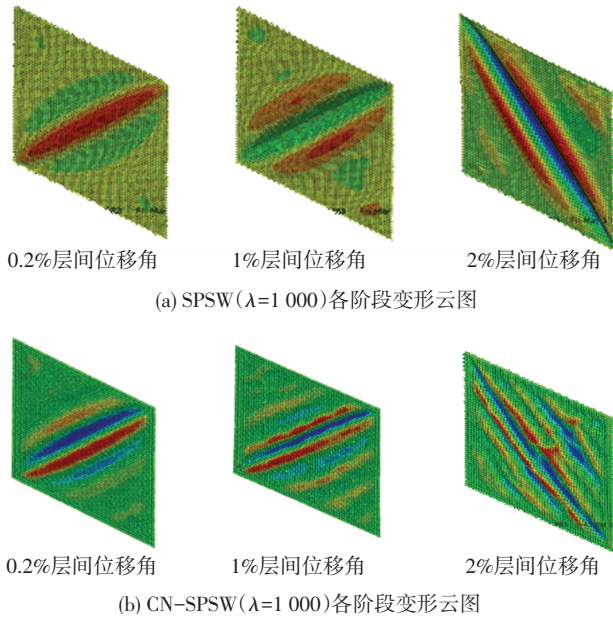


图 6 SPSW 与 CN-SPSW 钢板最大面外位移对比

Fig.6 Comparison of CN-SPSW's and SPSW's maximum out-of-plane deformation

SPSW 在层间位移角从 0.2% 到 2% 的过程中变形模式基本不变,即在对角线形成 3 条主要拉力带,整个钢板墙拉力分配不均匀,如图 7(a) 所示。而 CN-SPSW 在层间位移角从 0.2% 到 2% 过程中,变形模式有较大改变,钢板受拉区域明显增加,应力分布趋于均匀,钢板利用率提高,具体结果如图 7(b) 所示。索网抑制构件为主拉力带提供面外支撑,使主拉力带被分割为多段短的拉力区,分割后的拉力带因计算长度变小,当反向加载时,拉力带转而受压,则能够承载更多的压力,进而使钢板受力性能劣化程度降低。



(a) SPSW( $\lambda=1000$ )各阶段变形云图

(b) CN-SPSW( $\lambda=1000$ )各阶段变形云图

图 7 SPSW 与 CN-SPSW 面外变形云图对比

Fig.7 Out-of-plane deformation comparison of SPSW and CN-SPSW

### 3.2 抗剪性能

#### 3.2.1 骨架曲线

如图 8 所示,两类钢板剪力墙都具有较好的延性,但 CN-SPSW 的峰值承载力较 SPSW 提高了 18%。显然,预应力索网抑制构件的作用使内填钢板受力更加均匀,导致更大区域的钢板提前进入硬化阶段。

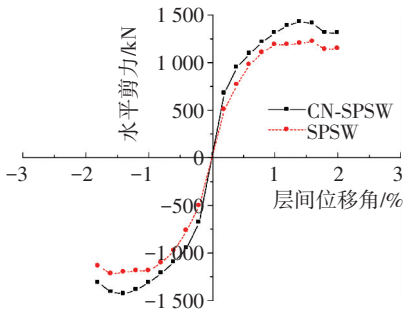


图 8 CN-SPSW 与 SPSW 骨架曲线对比( $\lambda=1000$ )

Fig.8 Comparison of CN-SPSW's and SPSW's skeleton curves ( $\lambda=1000$ )

#### 3.2.2 抗侧刚度退化

在滞回分析加载、卸载过程中,不可避免伴随着刚度退化,为分析方便,在一个加载循环中,将正向和反向加载峰值点的连线斜率定义为其等效抗侧刚度<sup>[12]</sup>。图 9 给出两类钢板剪力墙在每个循环阶段的等效抗侧刚度。两类钢板剪力墙整个退化过程较为平稳,加载位移角至 0.6%时,构件塑性未充分发展,抗侧刚度退化迅速;当塑性充分发展后,其抗侧刚度趋于稳定。索网抑制构件使内填钢板初始刚度提高 36%,在层间位移角小于 0.6%时,索网能有效地抑制钢板发生整体剪切屈曲,刚度提高较大。

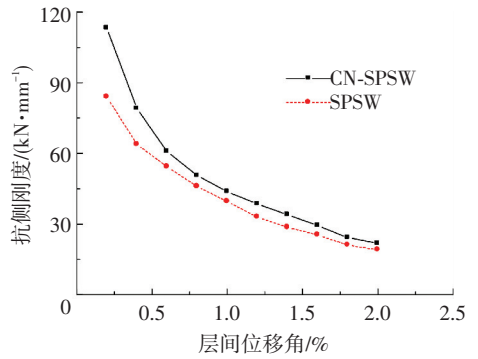


图 9 抗侧刚度退化曲线

Fig.9 The curve of stiffness degradation

### 3.3 耗能能力

#### 3.3.1 滞回曲线

CN-SPSW( $\lambda=1000$ )与 SPSW( $\lambda=1000$ )滞回性能对比如图 10 所示。整体上看,CN-SPSW 的滞回曲线更加饱满,在拉力带退化区域平均剪应力较 SPSW 相差较大。预应力索网抑制构件的约束作用将钢板面外自由变形转换为高阶屈曲变形<sup>[4]</sup>。随着层间位移角的增大,产生的面外位移导致索内的回复力增大,对钢板约束增强,CN-SPSW 耗能性能进一步提升。

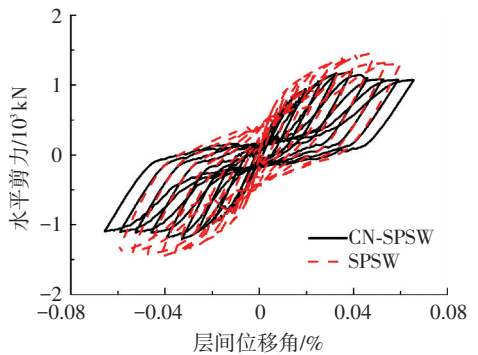


图 10 CN-SPSW 与 SPSW 滞回曲线对比( $\lambda=1000$ )

Fig.10 Comparison of CN-SPSW's and SPSW's hysteretic curves ( $\lambda=1000$ )

#### 3.3.2 能量耗散系数

滞回环包围面积量化了 SPSW 与 CN-SPSW 耗能能力大小,见图 11。当达到 2%层间位移角时,CN-SPSW 耗能量较 SPSW 提高了 50%。累计耗能量提高 47%。

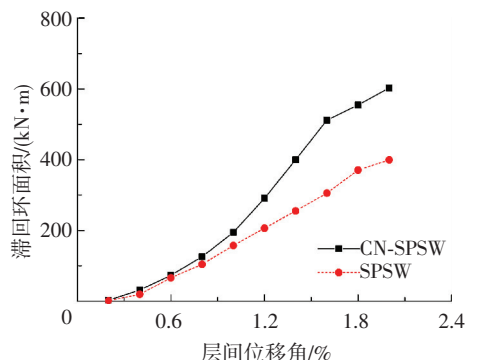


图 11 各阶段滞回环包围面积( $\lambda=1000$ )

Fig.11 Loop area of each load step ( $\lambda=1000$ )

能量耗散系数<sup>[19]</sup>能够反应滞回曲线的饱满程度,计算方法为

$$E = \frac{S_{ABC} + S_{CDA}}{S_{DOF} + S_{BOE}} \quad (2)$$

式中: $S_{ABC}$ 和 $S_{CDA}$ 分别代表上半部和下半部滞回曲线的面积, $S_{DOF}$ 和 $S_{BOE}$ 代表虚线围成的三角形面积,见图 12.其物理意义是材料塑性变形消耗的地震能量占输入总能量的比例.

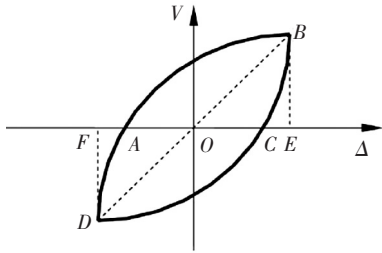


图 12 能量耗散系数示意

Fig.12 Energy dissipation coefficients

对比宽厚比  $\lambda = 1\ 000$  的 SPSW 的能量耗散系数(图 13)可知:随着侧向位移增大,钢板参与塑性耗能的部分增多.当层间位移角小于 0.6% 时,两类钢板剪力墙的耗能效率基本相同,随后两者的耗能系数差距在逐步增大,当达到 2% 层间位移角时,CN-SPSW 较 SPSW 能量耗散系数提高 31%.可见,预应力索网抑制构件的设置能大幅提高内填钢板的耗能能力.

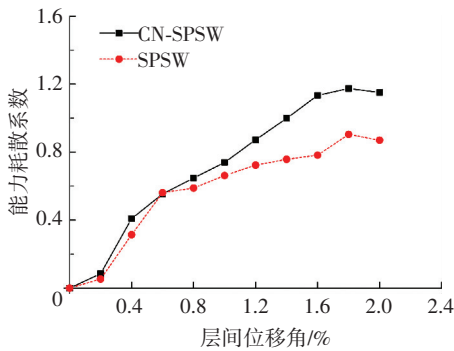


图 13 各阶段能量耗散系数( $\lambda = 1\ 000$ )

Fig.13 Energy dissipation ratio of each load step ( $\lambda = 1\ 000$ )

初步统计耗能性能的经济指标.针对 3 m×3 m,宽厚比  $\lambda = 1\ 000$  的 CN-SPSW,用钢量见表 2,累计耗能量较 SPSW 提高 47%,而用钢量提升 33%.对于 CN-SPSW,相对于构件用钢量的增加,耗能能力提高更快.

表 2 各构件用钢量

Tab.2 Steel volumes of each component  $\text{kg/m}^2$

构件名称	索	索框	钢板	总计
CN-SPSW	1.36	6.4	23.55	31.31
SPSW	—	—	23.55	23.55

## 4 CN-SPSW 参数分析

### 4.1 索预拉力对耗能能力的影响

索网抑制构件中索网对钢板的约束效果与索径和索内初始应力有关,本文通过索预拉力值来考虑以上两种因素的影响,各参数选取见表 3.

表 3 CN-SPSW 分析参数

Tab.3 Analysis parameters of CN-SPSW

宽厚比 $\lambda$	索数/根	索预拉力/kN
600	5	0、20、40
1 000	5	0、20、40、120
3 000	3	0、40、200
3 000	3	20、40、150

针对 CN-SPSW (宽厚比  $\lambda = 3\ 000$ 、纵横布置 3 道索)进行滞回分析,结果见图 14~15.索网内预拉力为 40 kN 以下时总体抑制屈曲效果较为相近,继续增大预拉力至 150 kN 时,累计能量耗散系数较索力为 40 kN 的剪力墙提高 11%.

同样针对 CN-SPSW,当宽厚比  $\lambda = 1\ 000$ ,纵横布置 5 道索时,得到滞回曲线见图 16~17.在层间位移角为 2% 时,预拉力为 40 kN 和 120 kN 时剪力墙的耗能能力明显较索预拉力为 20 kN 以下时高,但索拉力超过 40 kN 后,随着预拉力值的增加,能量消耗效率提高幅度不大.

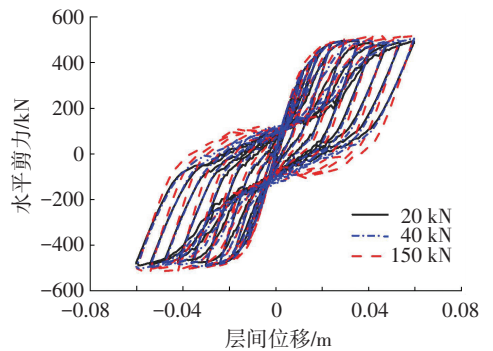


图 14 不同索预拉力下滞回曲线对比( $\lambda = 3\ 000$ )

Fig.14 Comparison of hysteretic curves in different cable force ( $\lambda = 3\ 000$ )

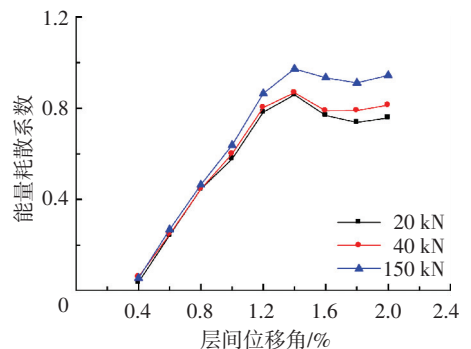


图 15 不同索力下能量耗散系数( $\lambda = 3\ 000$ )

Fig.15 Comparison of energy dissipation ratio in different cable force ( $\lambda = 3\ 000$ )

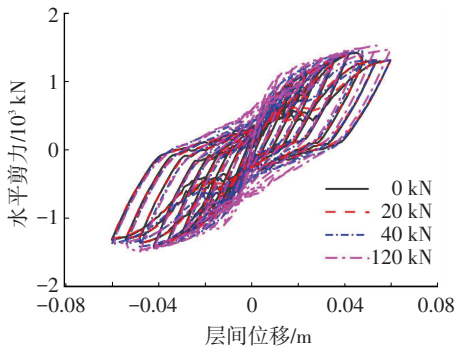


图 16 不同索预拉力下滞回曲线对比 ( $\lambda=1\ 000$ )

Fig.16 Comparison of hysteretic curves in different cable force ( $\lambda=1\ 000$ )

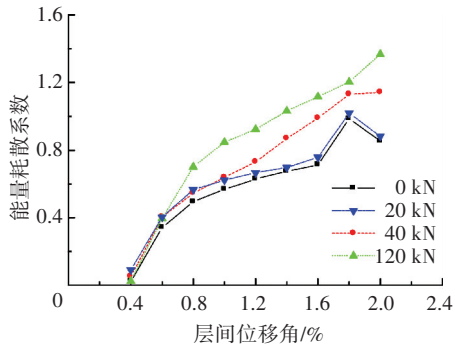


图 17 不同索力下能量耗散系数 ( $\lambda=1\ 000$ )

Fig.17 Comparison of energy dissipation ratio in different cable force ( $\lambda=1\ 000$ )

由上可知,索内预拉力大小对 CN-SPSW 滞回效果有一定影响,但很难单纯依靠索力的增大来提高耗能性能,显然,存在能有效改善薄钢板受力性能的最小预拉力.当超过这一值后,继续增加索预拉力,对钢板耗能性能影响不大,不宜单纯改变预拉力来提升索网抑制构件的约束效果.表 4 给出了不同宽厚比和索布置情况下能有效改善薄钢板耗能能力的最小索预拉力值,以及相对于同几何尺寸的非加劲钢板剪力墙累计耗能的提高幅度.

表 4 CN-SPSW 有效预拉力值

Tab.4 Effective pretension of cable

宽厚比 $\lambda$	索数/根	索拉力/kN	累计耗能提高幅度/%
600	5	40	32
1 000	5	40	47
	3	200	35
3 000	3	20	71

### 4.2 索布置间距对抗剪性能的影响

布索间距参数见表 5,系统分析单向布置索数为 3、5、7 道时 CN-SPSW 的滞回效果.

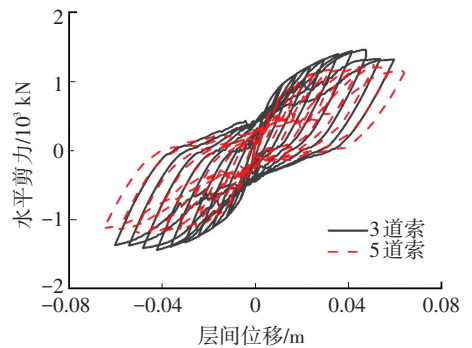
以宽厚比  $\lambda=1\ 000$  为例,纵横布置 5 道索时的滞回环较布置 3 道索时饱满,如图 18(a) 所示,各层间位移下布置 5 道索的 CN-SPSW 耗能效率皆优于 3 道索.因为 3 道索网格较为稀疏,划分的内填钢板区格面积较大,因此要求提供更高的索力来抑制内填钢板的整体屈曲.在总索力一致的前提下,5 道索

的索力分配效率最高,约束更加有效.由图 18(b) 可知,纵横布置 7 道索的 CN-SPSW 的滞回效果与布置 5 道索较为接近.因为在同样满足索框变形要求的前提下,7 道索提供的总体索力值与 5 道索情况基本一致,这样虽索根数有所增加,钢板抑制区格变密,但索内力减小,总体的抑制屈曲效果不明显.经过计算,对于宽厚比在 600~3 000 的 CN-SPSW,布置 5 道索(即索与索间距为 470 mm)较为合理.

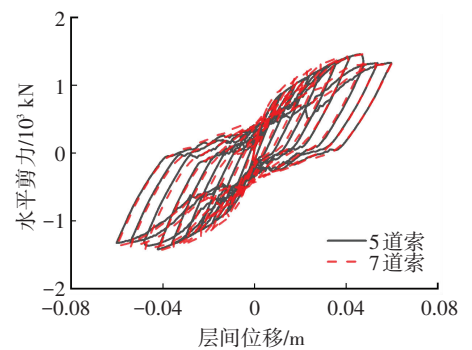
表 5 CN-SPSW 试件参数

Tab.5 Parameters of specimen CN-SPSW

宽厚比 $\lambda$	索数/根	索预拉力/kN
600	5	40
	7	25
1 000	3	30
	5	20
3 000	7	15
	3	20
	5	10



(a) 3 道索与 5 道索 ( $\lambda=1\ 000$ )



(b) 5 道索与 7 道索 ( $\lambda=1\ 000$ )

图 18 不同索数下 CN-SPSW 滞回曲线对比 ( $\lambda=1\ 000$ )

Fig.18 Comparison of hysteretic curves in different number of cables ( $\lambda=1\ 000$ )

### 4.3 索与钢板间隙对钢板抗剪性能的影响

索与钢板间隙  $\delta$  ( $\delta$  表示索网外径与钢板外表面的法向距离)影响着索网与内填钢板的接触程度.

滞回曲线对比(层间位移 12 mm)选用 CN-SPSW 构件(宽厚比  $\lambda=3\ 000$ ,纵横各 3 道索,单根索力 25 kN),索网与钢板距离  $t$  分别取 2、5、10、30 mm,对其滞回性能分析,得到结果如下:

在层间位移角为 0.2% 时,  $\delta=2\text{ mm}$  时内填钢板初始刚度较  $\delta=5、10\text{ mm}$  时提高 11%, 而  $\delta=5\text{ mm}$  与  $\delta=10\text{ mm}$  的内填钢板初始刚度基本相同。随着层间位移角增大至 1% 时,  $\delta=2、5$  和  $10\text{ mm}$  时 CN-SPSW 的抗侧刚度和滞回效果基本相同, 索与钢板初始间隙在钢板发生较大面外变形后可以忽略。

在钢板剪力墙达到 2% 层间位移角时, 面外变形见图 19。整体内填钢板只形成了 2 个拉力带, 而  $\delta=10\text{ mm}$  剪力墙的变形模式是形成多条拉力带, 索网与钢板的法向距离  $\delta$  过大后便不能抑制低阶屈曲。在 2% 层间位移角下, 间隙  $\delta=2、5、10\text{ mm}$  时

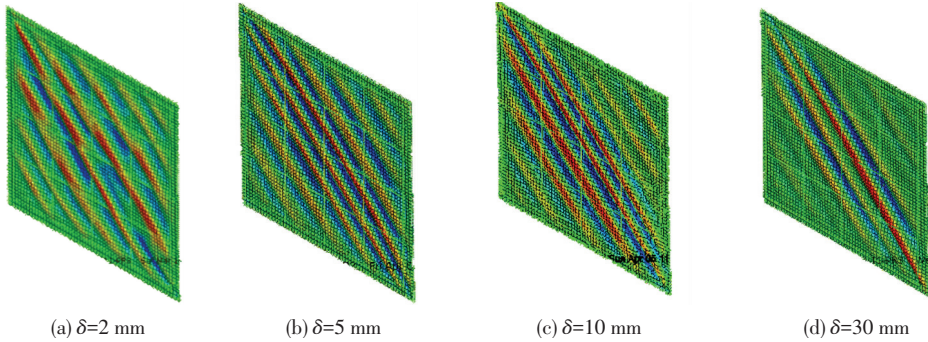


图 19 钢板面外变形云图

Fig.19 Out-of-plane deformation

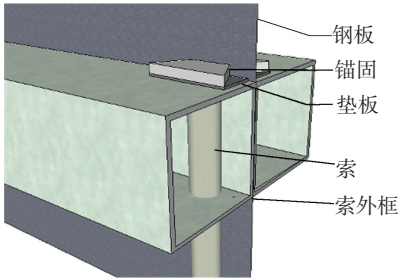


图 20 锚固端详图

Fig.20 Details of the anchorage

## 5 设计建议

采用上节得到的有效预拉力及合理索布置方式针对 CN-SPSW 进行宽厚比对能量耗散效率的影响规律研究, 其中图 21 给出不同宽厚比下 CN-SPSW 与 SPSW 能量耗散系数, 可见钢板宽厚比越大, 索网抑制构件提高耗能能力的效果越好; 对于宽厚比  $\lambda=600$  的剪力墙, CN-SPSW 较 SPSW 的能量耗散系数在不同层间位移角下最多相差 21%, 耗能效率提升不明显; 而宽厚比  $\lambda=1\ 000、3\ 000$  时, CN-SPSW 的能量耗散效率较同宽厚比的 SPSW 有明显提高。

基于以上研究, 提出了索网抑制屈曲钢板剪力墙设计建议:

1) 适用范围: 当  $\lambda=600$  时, CN-SPSW 耗能效率较 SPSW 提高不多, 故建议索网抑制屈曲构件宜用于宽厚比大于 600 的钢板剪力墙中。

CN-SPSW 的最大面外位移在 23 mm 至 27 mm 之间, 而  $\delta=30\text{ mm}$  时的面外位移达 38 mm。其原因在于, 法向距离  $\delta$  过大时, 只有索夹处能约束面外变形, 点约束的效果不好, 故索越贴近钢板, 越能更早地作为线约束来约束钢板防止其发生面外屈曲。

综上所述, 间隙  $\delta=10\text{ mm}$  的 CN-SPSW 仍能较好抑制钢板的面外鼓曲, 同时考虑到锚固端构造方便, 提出了锚固端节点如图 20 所示, 索外边缘紧贴着索框(方管)内壁, 索与钢板的距离为索框的厚度(厚度范围 10~12 mm); 横索与纵索无间隙。如图 2 的索夹构造所示, 横索紧贴着纵索。

2) 在宽厚比为 1 000~3 000 时, 钢板尺寸为 3 m×3 m 时, 索与索间距在 470 mm 左右, 预应力加载至 20~40 kN 时, 能有效改善钢板耗能能力。

3) 考虑索材料的充分利用, 索径的选用根据所需预拉力确定, 对于单向布置五道索时, 预应力施加为破断力的 40%~50%。

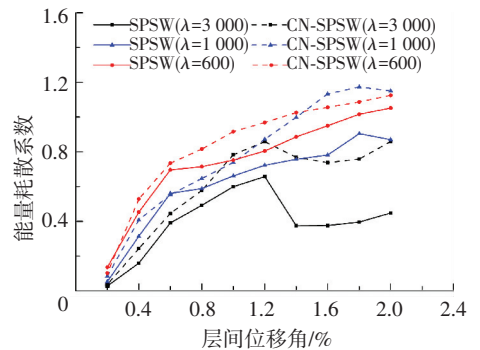


图 21 不同宽厚比下能量耗散系数对比

Fig.21 Comparison of width-to-thickness ratio in different cable force

## 6 结论

1) 索网抑制构件为屈曲后形成的拉力带提供侧向支撑作用, 钢板鼓曲面外位移减少, 形成更密的拉力带, 可提高钢板利用效率。以宽厚比  $\lambda=1\ 000$ , 横纵布置 5 道索的 CN-SPSW 为例, 其峰值承载力较同尺寸的 SPSW 提高 18%, 耗能能力提高 47%。

2) 索布置间距是影响索网抑制构件约束效果

的关键参数,索间距越小,索约束钢板面外变形效果越强。单纯增加索预拉力不改变间距时,约束面外变形效果提升不明显。针对 $3\text{m}\times 3\text{m}$ 的钢板,宽厚比 $\lambda = 1\ 000\sim 3\ 000$ 的CN-SPSW,合理的索距在 $470\text{mm}$ 左右,有效的索预拉力为 $20\sim 40\text{kN}$ 。索网抑制构件作为一种柔性约束构件,宜用在宽厚比 $\lambda > 600$ 的薄钢板剪力墙中,当约束较厚钢板时,索径及框架截面会大幅增加,经济性不好。

3)索网抑制构件与内填钢板的间隙应尽可能小,设计时应尽可能紧贴索框壁,从而达到更好的约束效果。本文给出了SPSW的详细构造,它可以在工厂预制,运输到现场拼装,同时构件自重轻,对结构竖向受力影响小,具有施工快、安全、环保等特点。

## 参考文献

- [1] ROBERTS T M. Seismic resistance of steel plate shear walls [J]. *Engineering Structures*, 1995, 17(5): 344-351.
- [2] ELGAALY M. Thin steel plate shear walls behavior and analysis [J]. *Thin-walled Structures*, 1998, 32(1/2/3): 151-180.
- [3] 郭彦林,董全利. 钢板剪力墙的发展与研究现状[J]. *钢结构*, 2005, 20(1): 1-6.  
GUO Yanlin, DONG Quanli. Research and application of steel plate shear wall in high-rise buildings [J]. *Steel Construction*, 2005, 20(1): 1-6.
- [4] 曹正罡,杜鹏,邱星玮. 三类薄钢板剪力墙滞回性能及选型[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2014, 46(10): 10-16.  
CAO Zhenggang, DU Peng, QIU Xingwei. Hysteretic performance study and lectotype suggestion for three types of thin steel plate shear walls [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2014, 46(10): 10-16.
- [5] HITAKA T, MATSUI C. Experimental study on steel shear wall with slits [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2003, 129(5): 586-595.
- [6] 李峰,李慧,李振敏,等. 交叉加劲肋钢板剪力墙低周反复荷载试验研究[J]. *西安建筑科技大学学报(自然科学版)*, 2009, 41(1): 57-62.  
LI Feng, LI Hui, LI Zhenmin, et al. Cyclic test of diagonally stiffened steel plate shear wall [J]. *Journal of Xi'an University of Architecture and Technology (Natural Science Edition)*, 2009, 41(1): 57-62.
- [7] 陈国栋,郭彦林. 十字加劲钢板剪力墙的抗剪极限承载力[J]. *建筑结构学报*, 2004, 25(1): 71-78.  
CHEN Guodong, GUO Yanlin. Ultimate shear-carrying capacity of steel plate shear wall with cross stiffeners [J]. *Journal of Building Structures*, 2004, 25(1): 71-78.
- [8] 赵伟,杨强跃,童根树. 钢板剪力墙加劲肋刚度及弹性临界应力研究[J]. *工程力学*, 2010, 27(6): 15-23.  
ZHAO Wei, YANG Qiangyue, TONG Genshu. Stiffener stiffness and elastic buckling stress of steel plate shear wall [J]. *Engineering Mechanics*, 2010, 27(6): 15-23.
- [9] 刘锋. 无粘结加劲钢板墙设计方法研究[D]. 北京:清华大学, 2013.  
LIU Feng. Studies on design method of the unbonded Stiffened Steel Plate wall [D]. Beijing: Tsinghua university, 2013.
- [10] 宁子健,郝际平,于金光,等. 无粘结十字加劲钢板剪力墙结构抗剪性能分析[J]. *钢结构*, 2013, 28(7): 11-15.  
NING Zijian, HAO Jiping, Yu Guangjin, et al. Analysis on shear performance of unbonded cross-stiffened steel plate shear wall [J]. *Steel Construction*, 2013, 28(7): 11-15.
- [11] ASTANEH-ASL A. Seismic behavior and design of composite steel plate shear walls [R]. Moraga: Structural Steel Educational Council, 2002: 7-8.
- [12] 郭彦林,周明,董全利. 防屈曲钢板剪力墙弹塑性抗剪极限承载力与滞回性能研究[J]. *工程力学*, 2009, 26(2): 108-114.  
GUO Yanlin, ZHOU Ming, DONG Quanli. Hysteretic Behavior of buckling-restrained steel plate shear wall [J]. *Engineering Mechanics*, 2009, 26(2): 108-114.
- [13] NATEGHI-ALAAHI F, KHAZAEI-POUL M. Experimental study of steel plate shear walls with infill plates strengthened by GFRP laminates [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2012, 78(6): 159-172.
- [14] 李正农,罗叠峰,吴红华. 单层平面索网玻璃幕墙结构研究现状综述[J]. *自然灾害学报*, 2010, 19(5): 1-6.  
LI Zhengnong, LUO Diefeng, WU Honghua. Summary of research on glass curtain wall structure with single layer plane cable net [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2010, 19(5): 1-6.
- [15] Seismic provisions for structural steel buildings: ANSI/AISC 341-05[S]. Chicago: American Institute of Steel Construction, 2010.
- [16] NEHRP recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures (FEMA450), part1: provisions [S]. Washington D. C.: Building Seismic Safety Council for the Federal Emergency Management Agency, 2003.
- [17] 钢结构工程施工质量验收规范: GB 50205—2001 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2001.  
Code for acceptance of construction quality of steel structures: GB 50205—2001 [S]. Beijing: China Standards Press of China, 2001.
- [18] 郭彦林,董全利,周明. 防屈曲钢板剪力墙滞回性能理论与试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2009, 30(1): 31-39.  
GUO Yanlin, DONG Quanli, ZHOU Ming. Test and analysis on hysteretic behavior of buckling-restrained steel plate shear wall [J]. *Journal of Building Structures*, 2009, 30(1): 31-39.
- [19] 建筑抗震试验方法规程: JGJ 101-96 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1991.  
Specification of testing methods for earthquake resistant building: JGJ 101-96 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1991.

(编辑 赵丽莹)