

屈曲约束钢板墙设计理论与应用*

李国强¹, 金华建², 孙飞飞¹, 陆 烨¹

(1 同济大学土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092; 2 同济大学土木工程学院, 上海 200092)

[摘要] 主要介绍了 TJ 型屈曲约束钢板墙刚度和承载力计算公式。其中 TJ 型屈曲约束钢板墙包括大高宽比、小高宽比以及开竖缝屈曲约束钢板墙三类。并针对屈曲约束钢板墙的约束板, 通过理论推导和有限元分析, 给出了完整的设计方法, 主要包括刚度需求和承载力需求两方面。此外, 为便于在框架结构中的设计和应用, 将钢板墙等效为偏心交叉支撑。这种简化模型不但可以简便地在各种设计软件中进行建模分析, 还可以较为准确地计算出屈曲约束钢板墙周边框架梁柱的内力。最后, 结合屈曲约束钢板墙自身受力特点和良好的耗能能力, 提出了防屈曲钢板联肢剪力墙结构的理念和关键技术。

[关键词] 屈曲约束钢板墙; 约束板; 设计方法; 简化模型; 防屈曲钢板联剪力墙结构

Design theory and application of buckling-restrained steel plate shear walls

Li Guoqiang¹, Jin Huajian², Sun Feifei¹, Lu Ye¹

(1 State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

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

Abstract: Methods of calculating the initial stiffness and yielding strength of TJ-type buckling-restrained steel plate shear walls were first introduced. And TJ-type buckling-restrained steel plate shear walls refer to large-aspect-ratio wall, small-aspect-ratio wall and buckling-restrained steel plate shear wall with slits. Meanwhile, demands on buckling restrainers were also brought forward in the respect of stiffness and strength through theoretical derivation and finite-element-method analysis. And buckling-restrained steel plate shear wall is innovatively equivalent to eccentric cross braces, in order to make the design and application of buckling-restrained steel plate shear walls in frame structures easier. This simplified model is not only suitable for modeling and analysis using main-stream software, but also capable of predicting the inner force of boundary frame precisely. Finally, concept and key technology of coupled buckling-restrained steel plate shear wall structure were proposed.

Keywords: buckling-restrained steel plate shear wall; buckling restrainer; design method; simplified model; coupled buckling-restrained steel plate shear wall structure

0 引言

屈曲约束钢板墙, 顾名思义, 就是指不会发生受剪屈曲的钢板墙, 一般由承受侧向力作用的芯板和不参与抗侧的约束板组合而成, 如图 1 所示。其受力机理不同于普通钢板剪力墙, 它是依靠芯板的面内整体弯剪变形来平衡外部作用。芯板作为核心抗侧力构件, 通过螺栓等连接键与约束板相连, 提高了本身的受剪屈曲承载力, 当大于屈服承载力时, 就如同厚钢板剪力墙一样避免了屈曲失稳, 从而改善了抗震耗能能力, 其典型的滞回曲线如图 2 所示。此外, 约束板还可以为芯板提供一定的防火保护, 一般采用钢筋混凝土板、内藏槽钢混凝土板或钢箱板等形式。

屈曲约束钢板墙根据芯板的高宽比或者根据弯曲变形和剪切变形所占比例, 可分为大高宽比墙^[1]和小高宽比墙^[2]。受力机理上, 大高宽比墙以

整体弯曲变形为主, 小高宽比墙则以整体剪切变形为主。

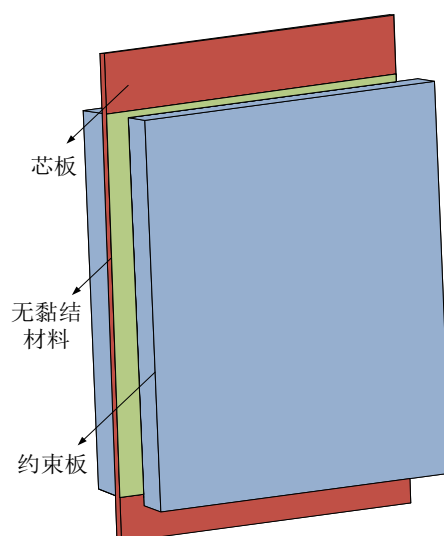


图 1 屈曲约束钢板墙的基本组成

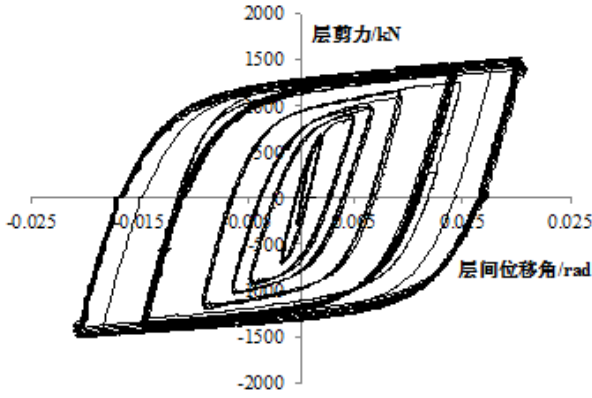


图2 屈曲约束钢板墙的滞回曲线

根据芯板是否削弱以及削弱方式的不同,又可分为开竖缝墙^[3]和一般屈曲约束钢板墙。其中开竖缝墙主要由缝间弯剪杆以及上中下板带的弯剪变形来提供抗侧刚度,并通过在弯剪杆端部形成塑性铰来耗散能量。

可见,屈曲约束钢板墙主要通过两种途径来抑制芯板发生屈曲失稳。一是在芯板两侧设置约束板,通过两者的协调变形来为芯板提供平面外刚度,以防止因抗弯刚度不足而发生屈曲失稳;二是通过削弱芯板,降低其受剪屈服承载力,并使其小于屈曲承载力。

目前,对于 TJ 型屈曲约束钢板墙,特别是大高宽比和小高宽比屈曲约束钢板墙,仍未有刚度和承载力计算公式,而开竖缝屈曲约束钢板墙刚度计算公式结果与试验结果仍有较大误差,因此有待修正。此外,约束板的研究目前也还不完善,缺少系统化的理论研究。从已有诸多试验研究中^[4]可以看出,约束板仍或多或少地存在约束不足的问题,以至于影响钢板墙耗能能力的发挥。因此本文通过经典理论,给出了 TJ 型屈曲约束钢板墙刚度和承载力的计算公式,推导了约束板的刚度需求和承载力需求,并将屈曲约束钢板墙等效为偏心交叉支撑,以便于在框架结构中的设计和应用。最后,结合屈曲约束钢板墙特点及较好的耗能能力,提出了防屈曲钢板联剪力墙结构概念和关键技术。

1 TJ 型屈曲约束钢板墙刚度和承载力公式

1.1 大高宽比屈曲约束钢板墙

1.1.1 初始刚度计算公式

大高宽比屈曲约束钢板墙的受力比矩形钢板剪力墙复杂,但可以矩形钢板墙为基础进行分析,先计算矩形 $H \times b_0$ 的初始刚度,然后根据 I 型钢板墙端部放大,对矩形墙的尺寸进行修正,得到初始刚度公式。

因此,大高宽比屈曲约束钢板墙的初始刚度可由下式进行计算:

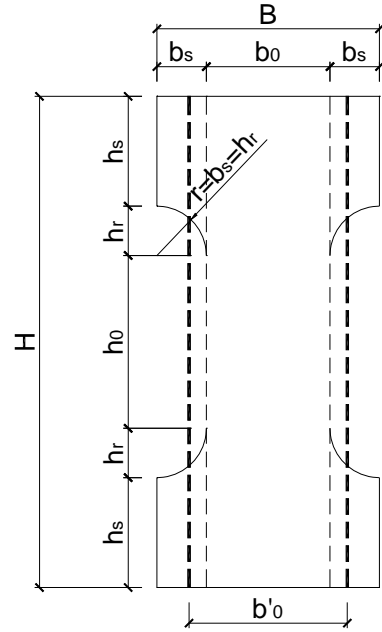


图3 大高宽比屈曲约束钢板墙芯板

$$K = \frac{Et}{2.6 \frac{H}{\beta_b b_0} + \left(\frac{H}{\beta_b b_0}\right)^3} \quad (1)$$

$$\beta_b = 1.053 \frac{A + A_s}{A} \quad (2)$$

经数值分析,若使 β_b 有比较好的精度, h_s 和 b_s 的取值范围宜为:

$$0.10B < b_s \leq 0.3B, \quad 0.10H < h_s \leq 0.22H$$

1.1.2 屈服承载力计算公式

经过大量模型计算和统计分析^[1],得出屈服线离板高中心的距离 H_y 可由下式计算得到:

$$H_y = 0.88 \left(\frac{H}{2} - h_s - b_s \right) \quad (3)$$

因此可得大高宽比屈曲约束钢板墙的屈服承载力计算公式:

$$Q_y = \frac{M_p Q_p}{\sqrt{Q_p^2 H_y^2 + M_p^2}} \quad (4)$$

$$M_p = \frac{t b_0^2}{4} f_y \quad (5)$$

$$Q_p = \frac{t b_0 f_y}{\sqrt{3}} \quad (6)$$

1.2 小高宽比屈曲约束钢板墙

1.2.1 初始刚度计算公式

对于小高宽比屈曲约束钢板墙,其初始刚度仍可由式(1)进行计算。经大量数值分析和统计分析,适用于小高宽比屈曲约束钢板墙的 β_b 为:

$$\beta_b = 0.96 \frac{A + A_s}{A} \quad (7)$$

1.2.2 屈服承载力计算公式

经过有限元验证，小高宽比屈曲约束钢板墙的屈服承载力计算公式与大高宽比屈曲约束钢板墙相同，即为：

$$Q_y = \frac{M_p Q_p}{\sqrt{Q_p^2 H_y^2 + M_p^2}} \quad (8)$$

1.3 开竖缝屈曲约束钢板墙

1.3.1 初始刚度计算公式

典型的开竖缝芯板如图4所示。在理想边界约束条件下，屈曲约束钢板墙的初始刚度可由下式^[5]进行计算：

$$K_e = \frac{1}{\frac{\kappa(H-ml)}{GBt} + \frac{\kappa l}{Gbt} \frac{m}{n} + \frac{(l+b)^3 m}{Etb^3 n}} \quad (9)$$

而当边界条件不理想时，特别是当边缘梁转动刚度小，导致面内转角较大时，则必须计入梁转动的不利影响^[6,7]，此时墙体的初始刚度由下式进行计算：

$$K = \frac{1}{1+\lambda} K_e \quad (10)$$

$$\lambda = \frac{H^2}{2K_\theta} / \frac{1}{K_e} = \frac{\theta}{\theta_y} \quad (11)$$

式中： K_θ 为钢板墙边缘梁的转动刚度； θ 为钢板墙屈服时刻边缘梁的面内转角； θ_y 为钢板墙的屈服层间位移角。

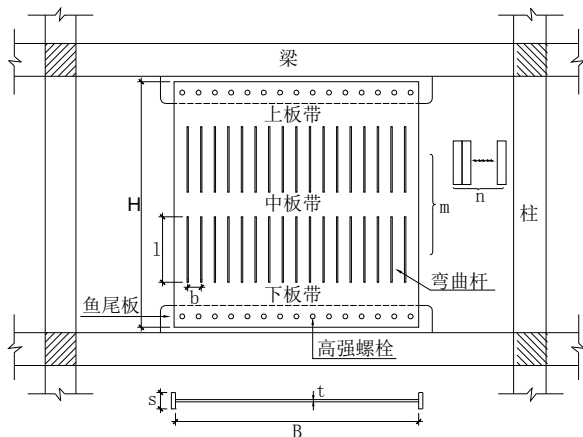


图4 开竖缝屈曲约束钢板墙芯板

1.3.2 屈服承载力计算公式

由于弯矩最大点出现在弯剪杆两端，随着荷载增大，假定弯剪杆两端截面外边缘纤维先发生屈服，然后墙板进入非线性阶段，即认为此时墙板所承担的剪力为墙板的初始屈服荷载。因此，屈服承载力为：

$$Q_y = \frac{ntb^2}{3l} f_y \quad (12)$$

2 约束板设计方法

2.1 刚度需求

2.1.1 矩形钢板弹性剪切屈曲

已知屈曲约束钢板墙中，约束板只为芯板提供面外约束而不参与抗侧，因此它只受到芯板对它作用的面外荷载。根据经典板壳理论^[8]，可分别得到芯板和约束板的平衡偏微分方程：

$$-D_s \left(\frac{\partial^4 \omega}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 \omega}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 \omega}{\partial y^4} \right) + N_y \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} + 2N_{xy} \frac{\partial^2 \omega}{\partial x \partial y} = -p(x,y) \quad (13)$$

$$-D_c \left(\frac{\partial^4 \omega}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 \omega}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 \omega}{\partial y^4} \right) = p(x,y) \quad (14)$$

式中： D_s 和 D_c 分别为芯板和约束板的抗弯刚度； N_y 为加载边受到的 y 向中面正应力； N_{xy} 为加载边受到的中面剪应力； $p(x,y)$ 为面外荷载。

将两式相加，即可得到屈曲约束钢板墙的平衡偏微分方程：

$$-(D_s + D_c) \left(\frac{\partial^4 \omega}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 \omega}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 \omega}{\partial y^4} \right) + N_y \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} + 2N_{xy} \frac{\partial^2 \omega}{\partial x \partial y} = 0 \quad (15)$$

对于两边连接屈曲约束钢板墙，其边界约束条件如图5所示。假定钢板墙加载边仍满足平截面假定，从而可得到加载边的正应力和剪应力，分别如图6和图7所示。

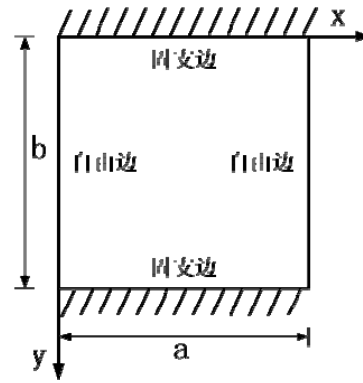


图5 两边连接屈曲约束钢板墙边界约束条件

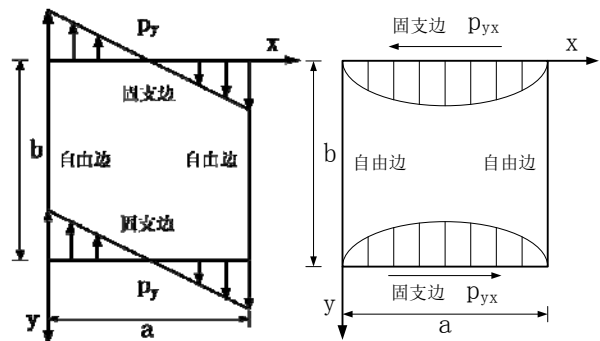


图6 加载边正应力分布

图7 加载边剪应力分布

从而得到中面正应力和中面剪应力为:

$$N_y = p_y = \frac{3Qb(a-2x)(b-2y)}{a^3} \quad (16)$$

$$N_{xy} = p_{xy} = \frac{6Q(a-x)x}{a^3} \quad (17)$$

通过假定满足两边连接钢板墙边界约束条件的挠曲面函数表达式,借助于能量法中的瑞利—里兹法,即可得到屈曲约束钢板墙的屈曲承载力 Q_{cr} 。根据屈曲承载力的计算公式,可反推得到屈曲系数的表达式。由于屈曲系数的理论表达式非常复杂和繁琐,因此本文借助于最小二乘拟合方法,并通过有限元分析的修正,得到了屈曲系数的最终表达式:

$$k_{cr} = 0.18\left(\frac{a}{b}\right)^4 + 6.62\left(\frac{a}{b}\right)^2 \quad [0.4,2] \quad (18)$$

从而,可以得到屈曲约束钢板墙约束板在满足不发生弹性屈曲条件下的最小抗弯刚度需求:

$$D_c \geq \frac{Q_y a}{k_{cr} \pi^2} - D_s \quad (19)$$

2.1.2 矩形钢板弹塑性剪切屈曲

当考虑弹塑性屈曲的不利影响时,则通常采用的是弹性模量折减的方法^[9]。通过将弹性屈曲系数乘以折减系数 $\sqrt{\eta}$,近似得到弹塑性屈曲系数。

根据弹塑性稳定理论,并借鉴轴向压力作用下 η 的计算方法,可根据下式近似计算钢板墙的 η :

$$\eta = \frac{Q_u \left(165 - \frac{Q_u}{at_s}\right)^2}{5.93E_s t_s a} \quad (20)$$

因此,约束板的抗弯刚度需求可修正为:

$$D_c \geq \frac{Q_y a}{\sqrt{\eta} k_{cr} \pi^2} - D_s \quad (21)$$

2.1.3 非矩形钢板的等效

前面推导中均是针对矩形钢板,而实际应用中钢板墙芯板并非矩形,而是 I 型或者开竖缝等形式。因此,本文根据屈服承载力相等的原则,将非矩形芯板等效成高度相同的矩形芯板,由此得到的等效宽高比即可得到等效的屈曲系数,它与弹性屈曲系数的比值即为芯板的抗弯刚度折减系数。具体计算公式如下:

$$a_{eq}/b = \sqrt{1.5\left(\frac{Q_y}{f_y b t}\right)^2 + \sqrt{\frac{9}{4}\left(\frac{Q_y}{f_y b t}\right)^4 + \frac{64}{25}\left(\frac{Q_y}{f_y b t}\right)^2}} \quad (22)$$

$$\Delta_s = \frac{k_{eq}}{k_{cr}} \quad (23)$$

2.1.4 约束板非连续接触的抗弯刚度折减

除了芯板需考虑削弱引起的修正之外,约束板的抗弯刚度 D_c 也需进行相应的修正。这是由于约束板与芯板之间是通过螺栓进行连接,因此,只有在螺栓连接处两者才是协调变形的,也就是说,只有在螺栓连接处两者的挠曲面函数值才是相同的,这时式(15)才是合理的,而其余各处式(15)是不成立的。显然,若连接螺栓排布达到一定密度,是可以近似地认为约束板与芯板是协调变形的。但是,当螺栓排布过密时,容易造成芯板削弱过大,而且,出于经济性等各方面的考量,螺栓的排布密度往往是达不到上述满足近似条件的程度,因此,就势必要对约束板的抗弯刚度贡献 D_c 进行折减,折减系数记为 Δ_b 。根据大量的有限元分析,表明该折减系数可偏于保守地取为 0.5。

综上所述,屈曲约束钢板墙约束板的抗弯刚度需求公式为:

$$D_c \geq \frac{2Q_y a}{\sqrt{\eta} k_{cr} \pi^2} - \frac{2k_{eq}}{k_{cr}} D_s \quad (24)$$

2.2 承载力需求

2.2.1 约束板的面外荷载 $p(x,y)$

由前一节已知满足钢板墙边界约束条件的挠曲面函数表达式,根据薄板大挠度理论,借助于伽辽金法,可较简便地得到挠曲面函数幅值 A 的计算公式:

$$A = \sqrt{\frac{a(Q_u - Q_{cr,p})}{3416e^{-3.7a/b} \pi^2 E t}} \quad (25)$$

其中 $Q_{cr,p}$ 为钢板墙弹塑性屈曲承载力。

将上述挠曲面函数代入芯板的平衡偏微分方程式(13),即可得到约束板的面外荷载 $p(x,y)$ 。

但是由于按上述方法得到的面外荷载 $p(x,y)$ 解析解形式较复杂,只能通过数值分析软件得到数值解后才能应用。同时,经计算,面外荷载 $p(x,y)$ 的最大值 $p(x,y)_{\max}$ 相较简便,用于实际设计偏于安全,因此本文采用面外荷载的最大值 $p(x,y)_{\max}$ 作为约束板的承载力设计荷载,表达式为:

$$p(x,y)_{\max} = \frac{AD_s}{a^4} [303.8 + 680.8\left(\frac{a}{b}\right)^2 + 390.9\left(\frac{a}{b}\right)^4] + 29.6 \frac{AQ_u}{a^2 b} \quad (26)$$

2.2.2 约束板的抗弯承载力需求

假定约束板受到大小为 $p(x,y)_{\max}$ 的均布荷载作用,且其边界条件可简化为两对边铰支两对边自由,如图 8 所示。

由此,即可得到约束板受到最大弯矩 M_{\max} :

$$M_{\max} = \frac{p(x,y)_{\max} ab \sqrt{a^2 + b^2}}{8} \quad (27)$$

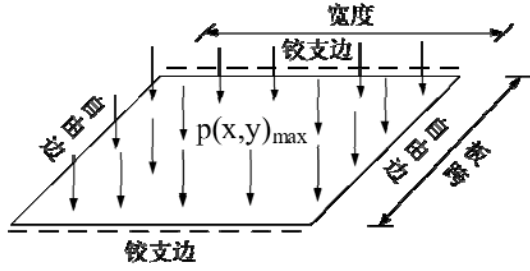


图8 两对边铰支两对边自由约束板

其中：板跨取斜对角线长度，宽度则根据面积相等原则取为板面积与板跨的比值。这是由于诸多试验结果均表明，作为约束板的钢筋混凝土板，其裂缝方向均平行于斜对角线方向。

对于钢筋混凝土约束板，只要保证其开裂弯矩 M_{cr} 大于上述最大弯矩 M_{max} ，即可保证其抗弯承载力满足需求。因此有：

$$M_{cr} = 0.292(1 + 5 \frac{E_s A_s}{E_c a t_c} + 0.5 \frac{E_s A'_s}{E_c a t_c}) \frac{ab}{\sqrt{a^2 + b^2}} f_t t_c^2 \geq M_{max} \quad (28)$$

式中： A_s 和 A'_s 分别是混凝土板的受拉钢筋面积和受压钢筋面积； E_c 和 E_s 分别为混凝土和钢材的弹性模量； f_t 为混凝土的抗拉强度。

同样地，对于钢箱约束板，只要保证其屈服弯矩大于上述最大弯矩即可满足需求，因此有：

$$M_y = \frac{4af_y t_c^2}{3b^2} [1 - \frac{1}{2}(1 - \frac{2t_b}{t_c})^3 - (1 - \frac{2t_t}{t_c})^3] \geq M_{max} \quad (29)$$

式中： t_b 和 t_t 分别是钢箱板下部盖板和上部盖板的厚度； f_y 为钢材的屈服强度。

2.2.3 约束板的冲切承载力需求

当约束板采用钢筋混凝土板时，由其构造可知，它与芯板连接螺栓处作用有集中力，该集中力即为所需验算的冲切力。冲切示意图如图9所示。显然，约束板与芯板间的螺栓应能承受上述面外荷载产生的反力。但由于 $p(x,y)$ 表达式复杂，且各处的螺栓受力不均匀，因此，为简化计算，本文假定各处螺栓均匀受力，并采用最大值 $p(x,y)_{max}$ 进行计算，此时，冲切力即螺栓轴向拉力 P_b 为：

$$P_b = \frac{abp(x,y)_{max}}{N} \quad (30)$$

根据《混凝土结构设计规范》^[10]，并做相应的简化，可近似并偏于保守地简化冲切承载力验算公式为：

$$\frac{abp(x,y)_{max}}{N} \leq 2f_t t_c^2 \quad (31)$$

其中 N 为螺栓个数

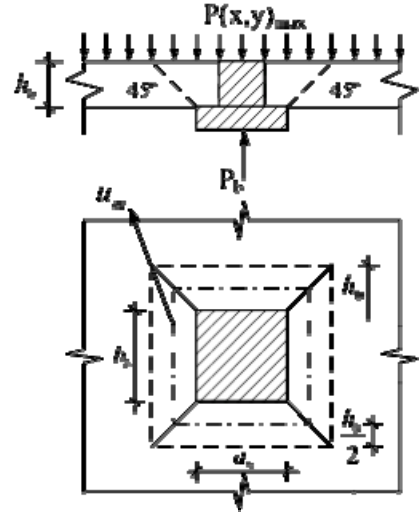


图9 约束板冲切力

2.2.4 约束板的局压承载力需求

当采用钢筋混凝土板作为约束板时，一般不需要进行局压承载力的验算，这是因为在钢筋混凝土板的厚度满足整体抗弯承载力要求的前提下，由于局部边界条件较整体边界条件更强且跨度更小，故必然满足局部承压的要求。

但是，当约束板采用钢箱板时，由于钢箱板内部空心，局部承压荷载直接作用于下部盖板，而板厚较薄，一般为钢箱板的整体厚度的 1/10~1/5，而且根据已有的试验破坏现象，在不发生整体抗弯破坏的前提下，下部盖板仍会发生局部承压破坏，表明钢箱板除了需考虑抗弯承载力的验算之外，还需要进行局部承压验算。

此外，由于钢材强度较高，在局部荷载作用下，挤压应力远小于其强度，因此可不作局部挤压验算。而对于混凝土板来说，诸多算例分析已表明，其局部挤压应力也小于其抗压强度，因此本文中也不对其进行局部挤压验算。

考虑2种情况进行局部承压验算：区格内钢箱板下部盖板以及内部加劲肋受最不利布置集中荷载作用。其中，区格内下部盖板的边界条件可保守假定为四边简支，如图10所示，且同样偏于保守地假定区格内部加劲肋端部为简支端，如图11所示。

因此，在最不利荷载作用下，可得下部盖板厚度 t_b 和区格边长 a_l 的最小要求：

$$t_b \geq \sqrt{\frac{1.79a_l^2 p(x,y)_{max}}{f_y}} \quad (32)$$

同理，对于两端简支的内部加劲肋，在最不利荷载下，可得其截面模量 W_s 的要求：

$$W_s \geq \frac{a_i^3 p(x,y)_{\max}}{4f_y} \quad (33)$$

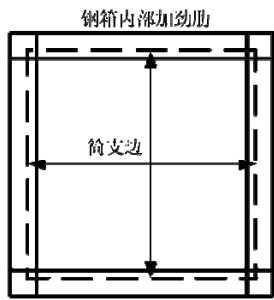


图 10 钢箱板下部盖板
(四边筒支)

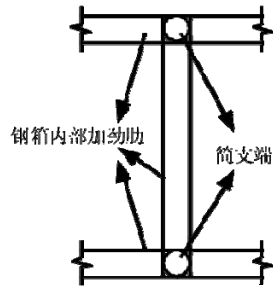


图 11 钢箱板内部加劲肋
(两端筒支)

2.2.5 约束板的螺栓需求

为保证芯板与约束板紧密相连，必须对连接处螺栓的抗拉承载力和变形提出严格要求。根据《钢结构设计规范》^[11]和《钢结构高强度螺栓连接技术规程》^[12]，摩擦型高强螺栓受到的拉力不得超过其受拉承载力，因此有：

$$P \geq \frac{1.25abp(x,y)_{\max}}{N} \quad (34)$$

其中 P 为摩擦型高强螺栓的预拉力。

为防止螺栓在轴向拉力作用下变形过大而导致面外约束作用减弱，还需限制螺栓的轴向变形，规定螺栓在轴向拉力作用下，其轴向变形不得超过其长度的 $1/2000$ ，由此得到螺栓的最小直径 d 为：

$$d \geq \sqrt{\frac{8000abp(x,y)_{\max}}{\pi NE}} \quad (35)$$

3 简化计算模型

为便于将屈曲约束钢板墙应用于框架结构中，需要利用其简化计算模型。因此，借鉴开缝混凝土剪力墙和开缝钢板剪力墙的简化模型，本文将屈曲约束钢板墙等效为偏心交叉支撑，如图 12 所示。

因此，只要确定偏心交叉支撑的截面和相对于钢板墙宽度的偏心距，就可在设计软件中简便地模拟屈曲约束钢板墙，对结构进行弹性分析和设计。

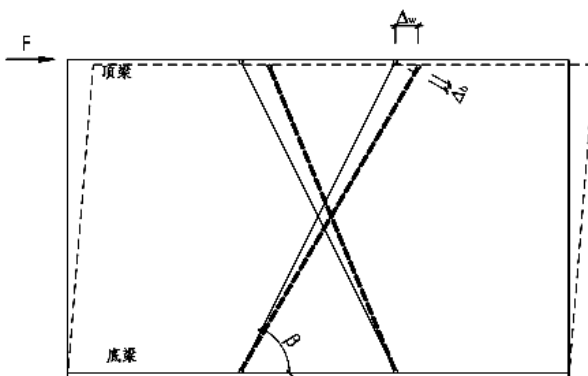


图 12 偏心交叉支撑

根据屈曲约束钢板墙与偏心交叉支撑的刚度相等原则，可以得到偏心交叉支撑的截面面积 A_b ：

$$A_b = \frac{Kl_b}{2E \cos^2 \beta} \quad (36)$$

式中： K 为屈曲约束钢板墙刚度； l_b 为偏心交叉支撑长度； β 为偏心交叉支撑与水平面的夹角。

而经过大量的分析计算^[1]，并经过数据的线性回归，可得到偏心交叉支撑偏心距 e 的经验公式：

当钢板墙不靠柱时： $e=0$ ；

当钢板墙靠柱时： $e=50\text{mm}$ 。

4 防屈曲钢板联肢剪力墙结构

传统的联肢剪力墙结构主要具有两方面的优点：1) 小震和风作用时，连梁联系联肢墙整体工作，刚度较大；2) 中震、大震作用时，连梁屈服，联肢墙独立工作，结构刚度减小、周期增长、地震作用减小，同时连梁屈服耗能减震。

但与实体剪力墙相比，传统的联肢剪力墙仍存在抗侧刚度不足的问题，而且震后连梁不易更换。因此，在此基础上，本文提出了抗侧刚度相对更大、耗能能力更强的防屈曲钢板联肢剪力墙结构，如图 13 所示。

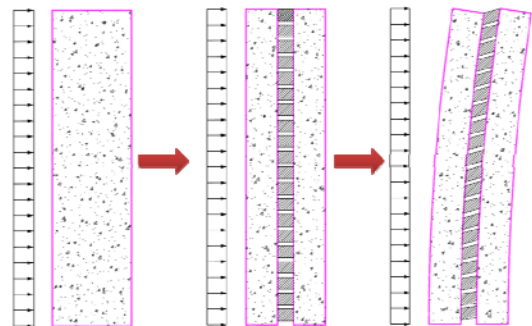


图 13 防屈曲钢板联肢剪力墙结构

从抗侧刚度上来看，它与实体墙相当。它的另一个优势在于，通过将屈服限制在防屈曲钢板上，使得震后结构更便于修复，只需将防屈曲钢板进行更换即可。此外，耗能构件防屈曲钢板还具有延性好的特点。

针对上述提出的新型耗能减震结构，本文提出了 3 项关键技术，分别为：1) 整体墙的设计；2) 防屈曲钢板墙的设计；3) 防屈曲钢板墙与整体墙的连接节点。

4.1 整体墙的设计

整体墙的设计方法主要包括以下 4 点：1) 墙的整体分析可参照传统联肢墙，采用连续化方法或有限元方法；2) 墙的设计原则为：小震不坏、中震和大震钢板墙先于混凝土墙屈服；3) 设 V_d 为墙小震下底部剪力，钢板墙按 V_d 下不屈服设计；4) 混凝土墙按 $1.35V_d$ 下不屈服设计。

4.2 防屈曲钢板的设计

防屈曲钢板墙的设计如本文的第 1 节和第 2 节所述。

4.3 防屈曲钢板墙与整体墙的连接节点

防屈曲钢板墙与整体墙连接节点的设计要求一般有 2 点：1) 该节点的承载力，应大于考虑强化影响的钢板墙极限承载力；2) 该节点的构造，应考虑便于混凝土墙的施工和钢板墙的安装。一般来说，该节点可采用如图 14 所示的构造。

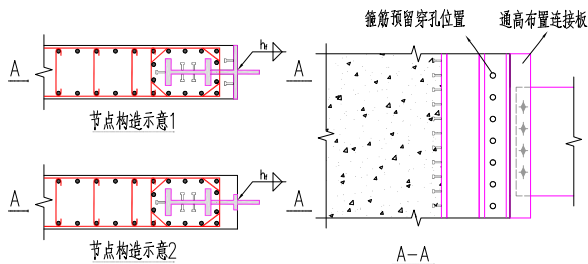


图 14 防屈曲钢板墙与整体墙连接节点

5 结论

(1) 给出了 TJ 型屈曲约束钢板墙刚度和承载力计算公式，包括大高宽比、小高宽比以及开竖缝屈曲约束钢板墙三类。

(2) 给出了完整的屈曲约束钢板墙约束板的设计方法，包括刚度需求和承载力需求两方面。

(3) 为便于在框架结构中的应用，给出了适用于屈曲约束钢板墙的简化计算模型——偏心交叉支撑，并确定了偏心交叉支撑截面积和偏心距的计算方法。

(4) 提出了一种新型的耗能减震结构——防屈曲钢板联肢剪力墙结构，并明确了 3 项关键技术。

参 考 文 献

[1] 陆焯. 大高宽比屈曲约束组合墙钢框架束柱体系性能研

究[D]. 上海：同济大学，2009.

[2] 刘学亮. 小高宽比屈曲约束钢板剪力墙抗震性能研究[D]. 上海：同济大学，2012.

[3] 王文涛. 屈曲约束开缝钢板剪力墙试验研究与理论分析[D]. 上海：同济大学，2008.

[4] 戴成华. 框架-开缝组合钢板墙结构抗震设计方法研究[D]. 上海：同济大学，2009.

[5] HITAKA T, MATSUI C. Experimental Study on Steel Shear Wall with Slits[J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 2003, 129 (5) :586-595.

[6] 孙飞飞, 金华建, 李国强. 梁转动对屈曲约束开缝钢板剪力墙受力性能影响试验研究[J]. 建筑结构学报, 2013, 34 (9) :24-32.

[7] 李国强, 金华建, 孙飞飞. 梁转动对屈曲约束开缝钢板剪力墙受力性能影响有限元分析[J]. 建筑结构学报, 2013, 34 (9) :33-39.

[8] 铁木辛柯. 板壳理论[M]. 北京：科学出版社，1977.

[9] BLEICH F. 金属结构的屈曲强度[M]. 中译本. 北京：科学出版社，1965.

[10] GB 50010—2010 混凝土结构设计规范[S]. 北京：中国建筑工业出版社，2011.

[11] GB 50017—2003 钢结构设计规范[S]. 北京：中国计划出版社，2003.

[12] JGJ 82—2011 钢结构高强度螺栓连接技术规程[S]. 北京：光明日报出版社，2011.

*国家自然科学基金重大研究计划项目 (90815029)。

作者简介：李国强，博士，教授，博士生导师，Email: gqli@tongji.edu.cn。