

文章编号:1673-2049(2017)02-0001-09

# 自复位方钢管混凝土框架-薄钢板剪力墙结构的水平边缘构件受力分析

王先铁<sup>1</sup>,周绪红<sup>2</sup>,刘立达<sup>1</sup>,林麟琿<sup>1</sup>

(1. 西安建筑科技大学 土木工程学院,陕西 西安 710055; 2. 重庆大学 土木工程学院,重庆 400045)

**摘要:**基于薄钢板剪力墙在目标位移下充分屈服并形成拉力带,对绕梁腹板销轴转动的自复位方钢管混凝土框架-薄钢板剪力墙结构的水平边缘构件(中梁和顶梁)进行受力分析。分别对水平边缘构件在钢绞线预应力和薄钢板剪力墙拉力带作用下的受力进行分析,推导了钢绞线在目标位移下的拉伸预应力计算公式;基于薄钢板剪力墙极限破坏形态,研究了薄钢板剪力墙拉力带产生的水平边缘构件端部的轴力和剪力;提出了水平边缘构件的弯矩、剪力及轴力计算公式,明确了水平边缘构件的内力分布。结果表明:水平边缘构件内力公式计算值与有限元分析值吻合较好,可为水平边缘构件的设计提供参考。

**关键词:**自复位方钢管混凝土框架;薄钢板剪力墙;水平边缘构件;受力分析;内力

**中图分类号:**TU391 **文献标志码:**A

## Force Analysis of Horizontal Boundary Element of Self-centering Concrete Filled Square Steel Tubular Frame with Thin Steel Plate Shear Walls

WANG Xian-tie<sup>1</sup>, ZHOU Xu-hong<sup>2</sup>, LIU Li-da<sup>1</sup>, LIN Lin-hui<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, Shaanxi, China;

2. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

**Abstract:** Based on the full yield of thin steel plate shear wall and the formation of tensile strip, force analysis was conducted for the horizontal boundary elements (middle beam and top beam) of self-centering concrete filled square steel tubular frame with thin steel plate shear walls, which rolled about the pin of the web. The forces of the horizontal boundary elements were studied under the pre-stressing of the strands and the tensile strip of the thin steel plate shear walls, respectively. The calculation formula of the tensile stress was derived under the target drift. Based on the ultimate failure mode of thin steel plate shear wall, the axial forces and shear forces of the horizontal boundary element in the ends were studied. The calculation formula of the bending moment, shear force and axial force of the horizontal boundary elements were proposed. The distribution of the internal force of the horizontal boundary element was defined. The results show that the calculation results of the formula agree well with the finite element results.

**Key words:** self-centering concrete filled square steel tubular frame; thin steel plate shear wall; horizontal boundary element; force analysis; internal force

收稿日期:2016-09-30

基金项目:国家自然科学基金项目(51108369,51678474)

作者简介:王先铁(1979-),男,湖南常德人,教授,工学博士,E-mail:wangxiantie@163.com。

## 0 引言

中国现阶段的抗震思想是“小震不坏,中震可修,大震不倒”<sup>[1]</sup>。目前,“小震不坏”和“大震不倒”已经可以做到,但是对于“中震可修”的实现缺乏具体做法。震后会因为主体结构发生较大的塑性变形而导致结构维修费用和时间增加,有些结构甚至无法完全修复而不能继续使用<sup>[2]</sup>。近年来,以减小建筑结构震后残留变形为目标和有效控制结构最大变形的自复位结构逐渐成为国内外研究的热点。

自复位节点首先应用于混凝土结构,Cheok 等<sup>[3-4]</sup>、Priestley 等<sup>[5]</sup>对无黏结预应力混凝土框架梁柱节点的试验研究表明,该形式节点可以有效控制结构的破坏,并表现出良好的自复位能力。Ricles 等<sup>[6]</sup>首先将自复位节点应用于钢框架结构,对 8 个十字型带顶底角钢的梁柱自复位节点进行了试验研究。结果表明,后张拉自复位节点具有优异的弹性刚度、强度及延性,节点初始弹性刚度可达到全焊接节点,未出现明显的残余变形。Garlock 等<sup>[7-8]</sup>研究了不同参数对自复位钢框架节点性能的影响,提出了自复位框架基于性能的设计方法。Clayton 等<sup>[9-11]</sup>对 14 个单跨两层的自复位钢框架-钢板剪力墙(未加劲)试件进行了拟静力试验。结果表明,自复位钢框架-钢板剪力墙具有优异的延性和耗能性能,以及很大的初始刚度和良好的自复位能力。Dowden 等<sup>[12]</sup>基于承载力设计准则,推导了传统自复位钢板剪力墙结构的中梁内力计算公式,并提出了传统自复位节点设计方法。在中国,蔡小宁等<sup>[13]</sup>、潘振华等<sup>[14]</sup>对自复位钢框架节点的低周反复荷载试验研究表明,梁、柱在整个加载过程中保持弹性,塑性变形主要集中在节点角钢处,节点残余变形较小。朱昱等<sup>[15-19]</sup>对钢框架-自复位钢板剪力墙进行了有限元分析,初步提出了钢板剪力墙自复位结构体系的设计方法。

综上所述,目前国内外研究的自复位结构大部分采用绕梁翼缘转动和利用角钢耗能的自复位节点,且柱子基本为 H 型钢。由于后张拉梁柱节点对节点区强度和刚度有较高要求,因此钢框架自复位节点构造复杂,易产生预应力损失。方钢管混凝土柱比型钢柱具有更高的强度和刚度,且具有良好的经济性、施工性能及建筑适用性。将方钢管混凝土框架与自复位梁柱节点结合即可形成自复位方钢管混凝土框架。

为避免以往自复位节点的“梁增长”现象<sup>[9]</sup>,本

文提出了一种新型绕梁腹板中心销轴转动的自复位方钢管混凝土框架节点,并将包含该节点的自复位方钢管混凝土框架与薄钢板剪力墙结合,组成自复位方钢管混凝土框架-薄钢板剪力墙结构。对该新型结构进行研究,推导了中梁、顶梁在目标位移下的弯矩、剪力及轴力计算公式,并通过有限元软件 ABAQUS 建模分析,验证了计算公式的正确性,可为水平边缘构件的设计提供参考。

## 1 自复位方钢管混凝土框架-薄钢板剪力墙结构的屈服机制

新型绕梁腹板中心销轴转动的自复位方钢管混凝土框架节点如图 1 所示。预应力钢绞线沿梁腹板中线对称分布,贯通方钢管混凝土柱的钢绞线一端锚固于柱壁外侧的端板,另一端锚固于梁端锚固板。框架侧移过程中,梁上翼缘保持平面状态,不对墙体或楼板产生影响。

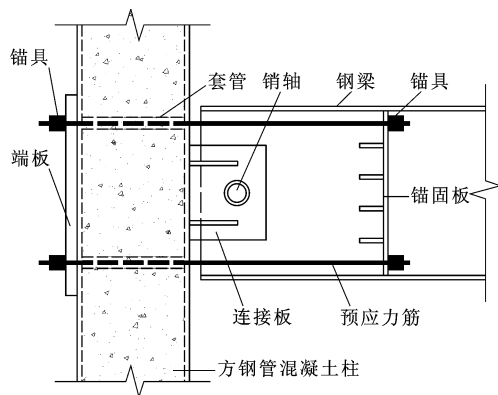


图 1 自复位节点

Fig. 1 Self-centering Connection

上述自复位方钢管混凝土框架与薄钢板剪力墙结合形成的新型结构的屈服机制如图 2 所示,其中, $V_1, V_2, V_3$  分别为施加在各层的层间剪力, $P_1, P_2$  为结构发生侧移时钢绞线对应的拉力值。理想状态下薄钢板剪力墙形成均匀拉力带。假设自复位结构发生侧移时,框架和钢绞线保持弹性状态,则各节点转动角度相同。

## 2 中梁受力分析

取包含中梁的框架中间层隔离体进行分析,见图 3,其中, $h$  为层高, $V_i$  为层间外荷载, $W_{bx1}, W_{bx2}$  分别为下层板和上层板拉力带对梁翼缘的水平合力, $W_{by1}, W_{by2}$  分别为下层板和上层板拉力带对梁翼缘的竖向合力, $W_{cx1}, W_{cx2}$  分别为下层板和上层板钢板剪力墙拉力带对边柱的水平合力, $W_{cy1}, W_{cy2}$  分别为

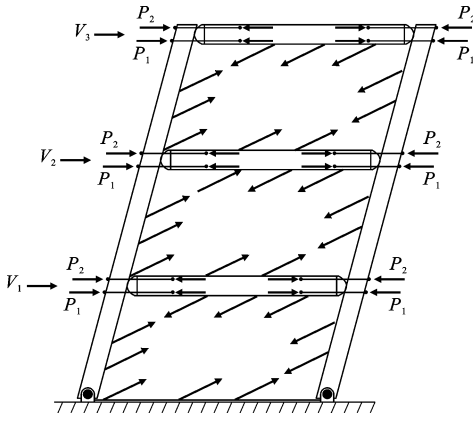


图2 自复位结构屈服机制

Fig. 2 Yield Mechanism of Self-centering Structure

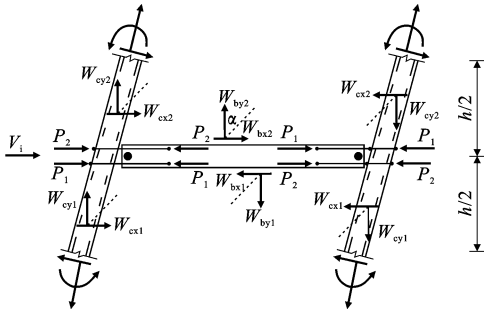


图3 中间层隔离体受力

Fig. 3 Force of Free Body of Middle Story

下层板和上层板钢板剪力墙拉力带对边柱的竖向合力<sup>[20]</sup>。

$W_{bx}, W_{by}, W_{cx}, W_{cy}$  由下式计算

$$W_{bx} = \omega_{bx} L = \frac{F_{wy} t \sin(2\alpha)}{2} L \quad (1)$$

$$W_{by} = \omega_{by} L = F_{wy} t \cos^2(\alpha) L \quad (2)$$

$$W_{cx} = \omega_{cx} \frac{h}{2} = F_{wy} t \sin^2(\alpha) \frac{h}{2} \quad (3)$$

$$W_{cy} = \omega_{cy} \frac{h}{2} = \frac{F_{wy} t \sin(2\alpha)}{2} \frac{h}{2} \quad (4)$$

式中:  $\omega_{bx}, \omega_{by}$  分别为梁上拉力场的水平分量和竖向分量;  $\omega_{cx}, \omega_{cy}$  分别为柱上拉力场的水平分量和竖向分量;  $F_{wy}$  为钢板剪力墙的屈服强度;  $t$  为钢板剪力墙厚度;  $\alpha$  为钢板剪力墙拉力带与竖直方向夹角;  $L$  为钢板剪力墙宽度。

## 2.1 钢绞线预应力对中梁的作用

分析中梁在钢绞线预应力作用下的受力情况, 计算简图如图4所示, 其中,  $P$  为预应力作用下中梁端产生的轴力,  $R_1, R_2$  均为剪力,  $L_1$  为转动点到钢绞线锚固点之间的距离。取中梁两端转动点间距与钢板剪力墙宽度相同, 均为  $L$ , 钢绞线间距为  $2y$ 。钢绞线初始预应力为  $P_0$ , 假设结构向右侧移,  $P_1$  对

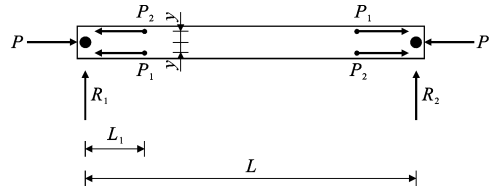


图4 预应力作用下中梁受力

Fig. 4 Force of Middle Beam Under Prestress

应钢绞线发生拉伸, 内力增加; 相反地,  $P_2$  对应钢绞线内力将减小。  $P_1, P_2$  计算公式分别为

$$P_1 = P_0 + \Delta P_1 = P_0 + \frac{A_{PT1} E_{PT1}}{L_{PT1}} (\Delta - \Delta_1) \quad (5)$$

$$P_2 = P_0 - \Delta P_2 = P_0 - \frac{A_{PT2} E_{PT2}}{L_{PT2}} (\Delta + \Delta_1) \quad (6)$$

其中

$$\Delta_1 = \frac{P_{PT} L_1}{A_{HBE} E_{HBE}} + \frac{P_{HBE(VBE)} L_1}{A_{HBE} E_{HBE}} \quad (7)$$

式中:  $\Delta P_1, \Delta P_2$  均为对应钢绞线内力增量;  $A_{PT}$  为钢绞线截面面积;  $E_{PT}$  为钢绞线弹性模量;  $L_{PT}$  为钢绞线长度;  $\Delta$  为节点发生转动时钢绞线变形量;  $\Delta_1$  为节点转动过程中中梁受压产生的变形;  $P_{PT}$  为节点转动后钢绞线拉力增量;  $A_{HBE}, E_{HBE}$  分别为中梁截面面积和弹性模量;  $P_{HBE(VBE)}$  为柱对中梁作用的轴力。

由公式(7)可得

$$P_{PT} = \frac{A_{HBE} E_{HBE}}{L_1} \Delta_1 - P_{HBE(VBE)} \quad (8)$$

节点转动过程中, 钢绞线拉力增大, 导致中梁受压, 该压力由钢绞线净伸长量决定, 其值为

$$P_{PT} = \frac{A_{PT} E_{PT}}{L_{PT}} (\Delta - \Delta_1) = k_{PT} (\Delta - \Delta_1) \quad (9)$$

由公式(8), (9)可得

$$\Delta_1 = P_{HBE(VBE)} / (k_{PT} + \frac{A_{HBE} E_{HBE}}{L_1}) +$$

$$[k_{PT} / (k_{PT} + \frac{A_{HBE} E_{HBE}}{L_1})] \Delta \quad (10)$$

$$\Delta = \phi_y \quad (11)$$

式中:  $\phi$  为结构侧移角;  $k_{PT}$  为钢绞线轴向刚度。

由图4可知, 由于不同钢绞线的张拉力不同, 在转动点处会产生剪力  $R_1, R_2$ , 对转动点取矩有

$$R_1 = (P_2 - P_1) \frac{2y}{L} \quad (12)$$

$$R_2 = (P_1 - P_2) \frac{2y}{L} \quad (13)$$

## 2.2 钢板剪力墙拉力场对中梁的作用

钢板剪力墙拉力场作用下中梁的受力如图5所示, 其中,  $d$  为梁高,  $R_3, R_4$  均为钢板剪力墙拉力带产生的剪力, 对转动点取矩有

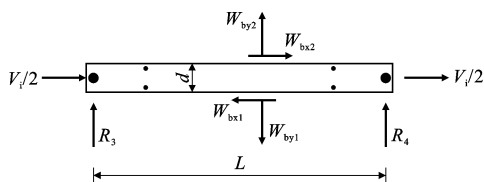


图5 拉力场作用下的中梁受力

Fig. 5 Force of Middle Beam Under Tension Field

$$R_3 = \frac{W_{by1} - W_{by2}}{2} - (W_{bx1} + W_{bx2}) \frac{d}{2L} \quad (14)$$

$$R_4 = \frac{W_{by1} - W_{by2}}{2} + (W_{bx1} + W_{bx2}) \frac{d}{2L} \quad (15)$$

由轴向力平衡有

$$V_i = W_{bx1} - W_{bx2} \quad (16)$$

### 2.3 中梁整体受力分析

中梁整体受力如图6所示。用  $N_L$  和  $N_R$  分别表示梁端左侧和右侧轴力,则

$$N_L = P_{HBE(VBE)} + \frac{V_i}{2} + P_1 + P_2 \quad (17)$$

$$N_R = P_{HBE(VBE)} - \frac{V_i}{2} + P_1 + P_2 \quad (18)$$

$$P_{HBE(VBE)} = W_{cx1} + W_{cx2} \quad (19)$$

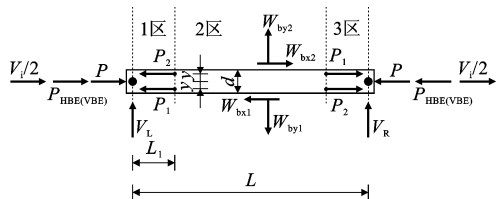


图6 中梁整体受力

Fig. 6 Complete Force of Middle Beam

分别用  $V_L$  和  $V_R$  表示左侧总剪力和右侧总剪力,则

$$V_L = R_1 + R_3 = (P_2 - P_1) \frac{2y}{L} + \frac{W_{by1} - W_{by2}}{2} - (W_{bx1} + W_{bx2}) \frac{d}{2L} \quad (20)$$

$$V_R = R_2 + R_4 = (P_1 - P_2) \frac{2y}{L} + \frac{W_{by1} - W_{by2}}{2} + (W_{bx1} + W_{bx2}) \frac{d}{2L} \quad (21)$$

### 3 中梁内力计算公式

如图6所示,以钢绞线锚固点为分界线将中梁分为3个部分,分别为1区、2区和3区,假设钢板剪力墙宽度与梁端转动点之间的距离相等,则1区至3区为预应力和钢板剪力墙拉力带共同作用区域。基于第2节的梁端剪力,推导梁的弯矩计算公

式,并确定各区段轴力和剪力计算公式。1区受力如图7所示,其中,  $W_{x1}$ ,  $W_{x2}$  分别为长度  $x$  范围内钢板剪力墙拉力带水平分量在中梁下翼缘和上翼缘产生的合力,  $W_{y1}$ ,  $W_{y2}$  分别为竖向分量在梁下翼缘和上翼缘产生的合力,  $M_1$ ,  $N_1$ ,  $V_1$  分别为1区  $x$  长度处对应的弯矩、轴力和剪力。

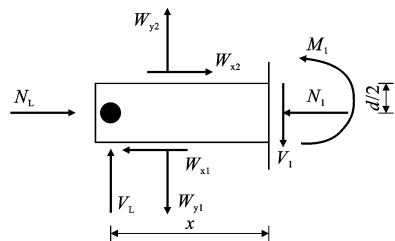


图7 1区梁段受力

Fig. 7 Force of Zone 1 of Middle Beam

由弯矩平衡得

$$M_1 = V_L x + (W_{x1} + W_{x2}) \frac{d}{2} - (W_{y1} - W_{y2}) \frac{x}{2} \quad (22)$$

将式(1),(2),(20)代入式(22)得

$$M_1 = (P_2 - P_1) \frac{2y}{L} x + \frac{t_1 - t_2}{2} \cdot F_{wy} \cos^2(\alpha) (Lx - x^2) \quad (23)$$

式中:  $t_1$ ,  $t_2$  分别为下层和上层钢板剪力墙厚度。

由竖向内力平衡得1区剪力为

$$V_1 = V_L + W_{y2} - W_{y1} \quad (24)$$

将式(20)代入式(24)得

$$V_1 = (P_2 - P_1) \frac{2y}{L} + \frac{F_{wy} \cos^2(\alpha)}{2} (t_1 - t_2) (L - 2x) - \frac{F_{wy} \sin(2\alpha)}{2} (t_1 + t_2) \frac{d}{2} \quad (25)$$

由水平力平衡得1区轴力为

$$N_1 = N_L + W_{x2} - W_{x1} \quad (26)$$

将式(1),(3),(17),(19)代入式(26)得

$$N_1 = F_{wy} (t_1 + t_2) \sin^2(\alpha) \frac{h}{2} + P_1 + P_2 + \frac{F_{wy} \sin(2\alpha)}{2} (t_1 - t_2) \left( \frac{L}{2} - x \right) \quad (27)$$

2区受力如图8所示,其中,  $M_2$ ,  $N_2$ ,  $V_2$  分别为2区  $x$  长度处对应的弯矩、轴力和剪力。

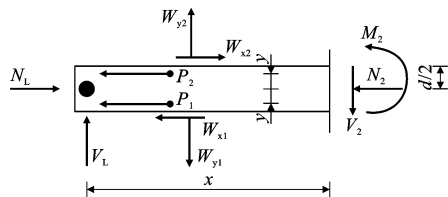


图8 2区梁段受力

Fig. 8 Force of Zone 2 of Middle Beam

由弯矩平衡得

$$M_2 = V_L x + (P_1 - P_2)y + (W_{x1} + W_{x2}) \frac{d}{2} + (W_{y2} - W_{y1}) \frac{x}{2} = (P_2 - P_1) \left( \frac{2x}{L} - 1 \right) y + \frac{t_1 - t_2}{2} F_{wy} \cos^2(\alpha) (Lx - x^2) \quad (28)$$

由轴向平衡得

$$N_2 = N_L + W_{x2} - W_{x1} - P_1 - P_2 = F_{wy} (t_1 + t_2) \sin^2(\alpha) \frac{h}{2} + \frac{F_{wy} \sin(2\alpha)}{2} (t_1 - t_2) \left( \frac{L}{2} - x \right) \quad (29)$$

2 区与 1 区相比,增加了水平方向的钢绞线预应力,对剪力分布没有影响,所以 2 区剪力计算公式与 1 区相同。

3 区受力如图 9 所示,其中,  $M_3$ ,  $N_3$ ,  $V_3$  分别为 3 区  $x$  长度处对应的弯矩、轴力和剪力。

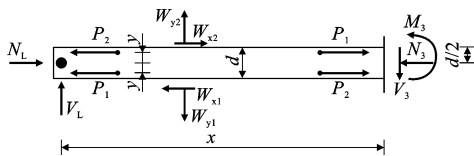


图 9 3 区梁段受力

Fig. 9 Force of Zone 3 of Middle Beam

由弯矩平衡得

$$M_3 = V_L x + (W_{x1} + W_{x2}) \frac{d}{2} + (W_{y2} - W_{y1}) \frac{x}{2} + (P_1 - P_2) 2y = (P_2 - P_1) \left( \frac{x}{L} - 1 \right) 2y + \frac{t_1 - t_2}{2} F_{wy} \cos^2(\alpha) (Lx - x^2) \quad (30)$$

由轴向平衡得

$$N_3 = N_L + W_{x2} - W_{x1} = F_{wy} (t_1 + t_2) \sin^2(\alpha) \frac{h}{2} + \frac{F_{wy} \sin(2\alpha)}{2} (t_1 - t_2) \left( \frac{L}{2} - x \right) + P_1 + P_2 \quad (31)$$

剪力计算公式与 1 区相同。

## 4 顶梁受力分析

顶梁受力与中梁相似,因顶梁仅下侧有钢板剪力墙,则在考虑钢板剪力墙拉力场的作用时与中梁不同,顶层隔离体受力如图 10 所示。

### 4.1 受力分析

钢绞线预应力对顶梁的作用与中梁相同,剪力计算公式同式(12), (13)。如图 11 所示,钢板剪力墙拉力场作用下,顶梁左侧剪力  $R_5$  为

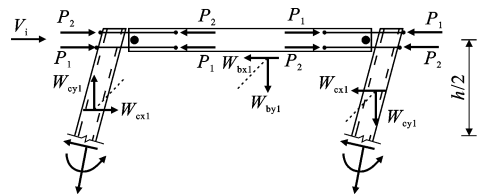


图 10 顶层隔离体受力

Fig. 10 Force of Free Body of Top Story

$$R_5 = \frac{W_{by1}}{2} - W_{bx1} \frac{d}{2L} \quad (32)$$

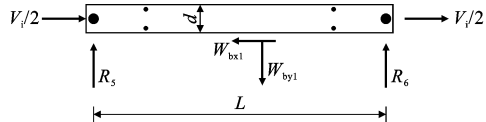


图 11 拉力场作用下的顶梁受力

Fig. 11 Force of Top Beam Under Tension Field

顶梁右侧剪力  $R_6$  为

$$R_6 = \frac{W_{by1}}{2} + W_{bx1} \frac{d}{2L} \quad (33)$$

由轴力平衡得

$$V_i = W_{bx1} \quad (34)$$

根据顶梁整体受力可得左侧总轴力  $N_{T-L}$  为

$$N_{T-L} = P_{T-HBE(VBE)} + \frac{V_i}{2} + P_1 + P_2 \quad (35)$$

式中:  $P_{T-HBE(VBE)}$  为顶层框架柱对顶梁梁端的轴力,  $P_{T-HBE(VBE)} = W_{cx1}$ 。

右侧总轴力  $N_{T-R}$  为

$$N_{T-R} = P_{T-HBE(VBE)} - \frac{V_i}{2} + P_1 + P_2 \quad (36)$$

左侧总剪力  $V_{T-L}$  为

$$V_{T-L} = R_1 + R_5 = (P_2 - P_1) \frac{2y}{L} + \frac{W_{by1}}{2} - W_{bx1} \frac{d}{2L} \quad (37)$$

右侧总剪力  $V_{T-R}$  为

$$V_{T-R} = R_2 + R_6 = (P_1 - P_2) \frac{2y}{L} + \frac{W_{by1}}{2} + W_{bx1} \frac{d}{2L} \quad (38)$$

### 4.2 内力计算公式

顶梁分区与中梁相同。顶梁 1 区受力如图 12 所示,其中,  $M_{T-1}$ ,  $N_{T-1}$ ,  $V_{T-1}$  分别为顶梁 1 区  $x$  长度处对应的弯矩、轴力和剪力,其计算公式分别为

$$M_{T-1} = (P_2 - P_1) \frac{2y}{L} x + \frac{t_1}{2} F_{wy} \cos^2(\alpha) (Lx - x^2) \quad (39)$$

$$V_{T-1} = (P_2 - P_1) \frac{2y}{L} + \frac{F_{wy} \cos^2(\alpha)}{2} t_1 (L - 2x) - \frac{F_{wy} \sin(2\alpha)}{2} t_1 \frac{d}{2} \quad (40)$$

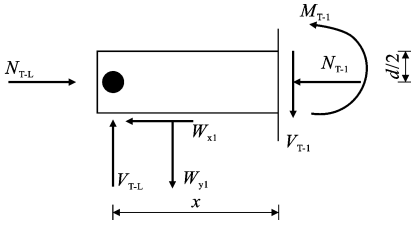


图 12 顶梁 1 区受力

Fig. 12 Force of Zone 1 of Top Beam

$$N_{T-1} = F_{wy} t_1 \sin^2(\alpha) \frac{h}{2} + P_1 + P_2 + \frac{F_{wy} \sin(2\alpha)}{2} t_1 \left( \frac{L}{2} - x \right) \quad (41)$$

顶梁 2 区受力如图 13 所示,其中,  $M_{T-2}$ ,  $N_{T-2}$ ,  $V_{T-2}$  分别为顶梁 2 区  $x$  长度处对应的弯矩、轴力和剪力,其计算公式分别为

$$M_{T-2} = (P_2 - P_1) \left( \frac{2x}{L} - 1 \right) y + \frac{t_1}{2} F_{wy} \cos^2(\alpha) (Lx - x^2) \quad (42)$$

$$V_{T-2} = (P_2 - P_1) \frac{2y}{L} + \frac{F_{wy} \cos^2(\alpha)}{2} t_1 (L - 2x) - \frac{F_{wy} \sin(2\alpha)}{2} t_1 \frac{d}{2} \quad (43)$$

$$N_{T-2} = F_{wy} t_1 \sin^2(\alpha) \frac{h}{2} + \frac{F_{wy} \sin(2\alpha)}{2} t_1 \left( \frac{L}{2} - x \right) \quad (44)$$

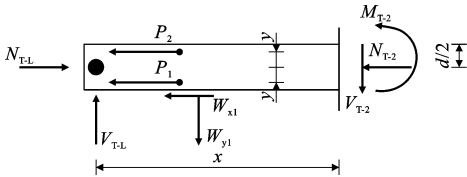


图 13 顶梁 2 区受力

Fig. 13 Force of Zone 2 of Top Beam

顶梁 3 区受力如图 14 所示,其中,  $M_{T-3}$ ,  $N_{T-3}$ ,  $V_{T-3}$  分别为顶梁 3 区  $x$  长度处对应的弯矩、轴力和剪力,其计算公式分别为

$$M_{T-3} = (P_2 - P_1) \left( \frac{x}{L} - 1 \right) 2y + \frac{t_1}{2} F_{wy} \cos^2(\alpha) (Lx - x^2) \quad (45)$$

$$V_{T-3} = (P_2 - P_1) \frac{2y}{L} + \frac{F_{wy} \cos^2(\alpha)}{2} t_1 (L - 2x) - \frac{F_{wy} \sin(2\alpha)}{2} t_1 \frac{d}{2} \quad (46)$$

$$N_{T-3} = F_{wy} t_1 \sin^2(\alpha) \frac{h}{2} + \frac{F_{wy} \sin(2\alpha)}{2} t_1 \left( \frac{L}{2} - x \right) + P_1 + P_2 \quad (47)$$

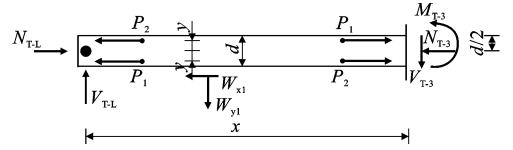


图 14 顶梁 3 区受力

Fig. 14 Force of Zone 3 of Top Beam

## 5 有限元分析

### 5.1 有限元模型验证

潘振华<sup>[21]</sup>对传统顶底角钢自复位钢框架足尺节点进行了试验研究,试件如图 15 所示。梁、柱均采用 Q345B 焊接 H 型截面。框架梁、柱截面分别为  $H500 \times 300 \times 14 \times 28$ ,  $H500 \times 500 \times 20 \times 20$ 。角钢截面为  $L300 \times 200 \times 16$ ,屈服强度为 440 MPa。预应力束选用公称直径为 15.2 mm,抗拉强度为 1 860 MPa 的  $1 \times 7$  钢绞线,共 4 根钢绞线,单根钢绞线预应力为 60 kN。

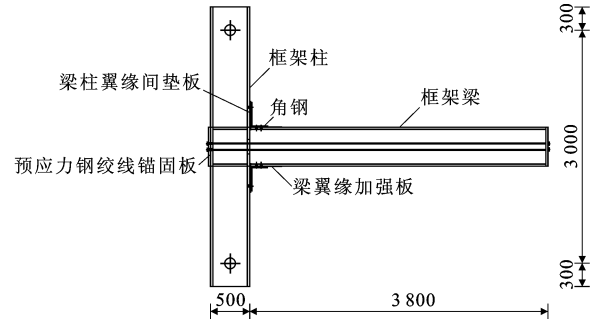


图 15 自复位节点试件(单位:mm)

Fig. 15 Self-centering Connection Specimen (Unit: mm)

利用有限元软件 ABAQUS 6.12 对该试验进行数值模拟。框架梁、柱等采用壳单元(S4R),螺栓采用实体单元(C3D8R),钢绞线采用杆单元(T3D2),通过降温法对钢绞线施加预应力。框架构件和钢绞线采用理想弹塑性模型,角钢材料的本构关系选用随动强化模型。框架构件和角钢弹性模量  $E_1 = 210\,500$  MPa,钢绞线的弹性模量  $E_{PT} = 195\,000$  MPa。对柱外翼缘端部施加固定边界条件,在梁端施加水平荷载,加载制度与试验相同。有限元分析滞回曲线与试验滞回曲线对比如图 16 所示。

角钢屈服前,节点初始刚度吻合较好。构件在峰值荷载前滞回曲线吻合较好,节点承载力基本相同。峰值荷载后,试验构件由于多次施加循环荷载出现刚度下降。由于有限元分析未能较好地模拟构件的损伤、几何缺陷等,每次重新加载时,节点具有相同的刚度,所以承载力高于试验。总体来看,有限元模拟结果与试验结果吻合较好。

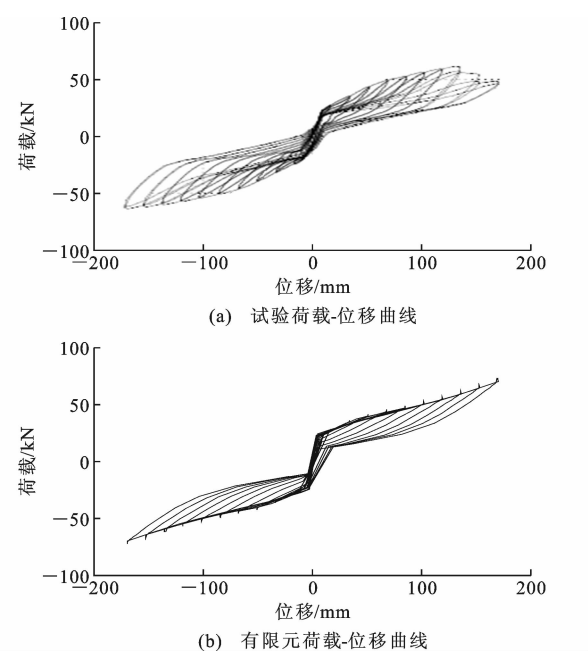


图 16 有限元模拟滞回曲线与试验滞回曲线对比

Fig. 16 Comparison of Hysteretic Curves Between Finite Element Simulation and Test

5.2 内力计算公式验证

建立一个单跨三层 1 : 3 比例的自复位方钢管混凝土框架-薄钢板剪力墙模型,几何尺寸如图 17 所示。竖向边缘构件采用方钢管混凝土柱,截面为  $\square 400 \times 12$ ,顶梁、中梁截面均为  $H300 \times 150 \times 10 \times 12$ ,内填钢板剪力墙厚度为 0.35 mm。钢绞线截面面积为  $600\text{ mm}^2$ ,钢绞线有效长度为 1 090 mm,沿梁高方向间距为 200 mm,初始预应力为 300 kN,采用降温法施加初始预应力。销轴直径为 30 mm。钢材本构关系选用随动强化模型,钢材弹性模量  $E=210\,500\text{ MPa}$ ,强化模量为  $0.02E$ ,钢绞线弹性模量为  $195\,000\text{ MPa}$ ,泊松比为 0.3。框架构件选用 Q345 钢,屈服强度为 345 MPa,内填钢板剪力墙选用 Q235 钢,屈服强度为 235 MPa,钢绞线抗拉强度为 1 865 MPa,混凝土选用 C40。钢材均选用壳单元(S4R),钢绞线选用杆单元(T3D2),销栓和钢管内混凝土选用实体单元(C3D8R)。考虑构件的几何非线性、材料非线性和接触非线性。混凝土采用塑性损伤模型,其塑性参数取值<sup>[22]</sup>如表 1 所示。

方钢管与混凝土之间的接触关系法向定义为“硬”接触,切向采用库仑摩擦模型,摩擦因数为 0.6。为防止结构发生面外变形,对顶梁和中梁上翼缘施加面外约束。柱脚采用铰接,按位移控制加载方法在柱顶上端面施加位移。有限元模型及网格划分如图 18 所示。以 2%层间位移角为极限状态,对应的

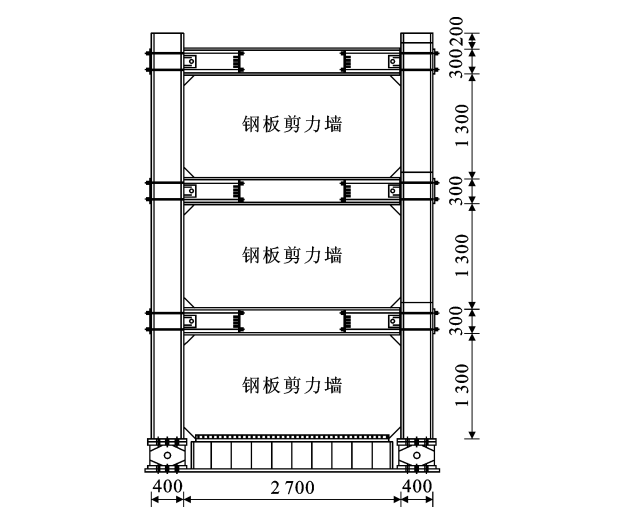


图 17 自复位模型几何尺寸(单位:mm)

Fig. 17 Geometrical Size of Self-centering Model (Unit:mm)

表 1 混凝土塑性参数

Tab. 1 Plastic Parameters of Concrete

膨胀角/(°)	偏心率 $\epsilon$	$\sigma_{b0}/\sigma_{c0}$	形状系数 $K_c$	黏性系数
30	0.1	1.16	0.667	0.000 5

注: $\sigma_{b0}$ 为初始等效双轴抗压强度; $\sigma_{c0}$ 为初始单轴抗压强度。

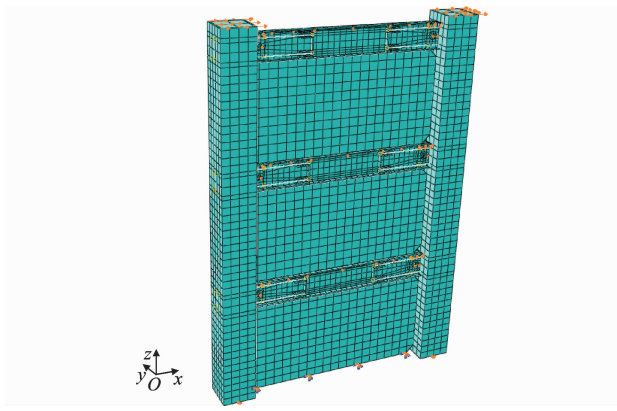


图 18 有限元模型

Fig. 18 Finite Element Model

Von Mises 应力如图 19 所示。由图 19 可知,钢板剪力墙已充分形成拉力带,完全屈服。自复位框架处于弹性状态,符合自复位钢板剪力墙结构在目标位移下的应力发展情况。提取顶梁、中梁代表性位置(图 20)的弯矩、剪力及轴力,并与公式计算结果进行对比,结果如表 2 所示。

由表 2 可知,公式计算结果与有限元分析结果吻合较好。结合表 2 数据,由图 19 中梁的应力分布可知:对于绕梁腹板销轴转动的自复位钢板剪力墙结构,梁中锚固钢绞线位置的弯矩最大;梁中锚固点至转动点之间的梁段轴力最大,中间段轴力最小;对

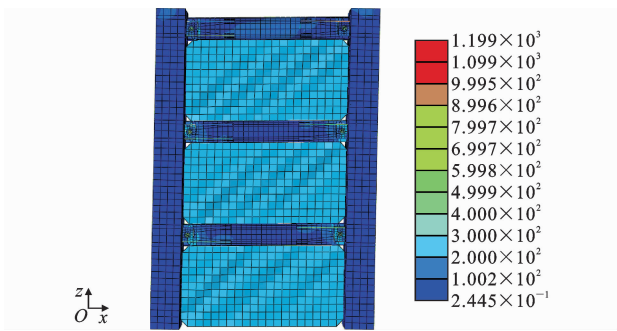


图 19 Von Mises 应力 (单位:MPa)  
Fig. 19 Von Mises Stress (Unit:MPa)

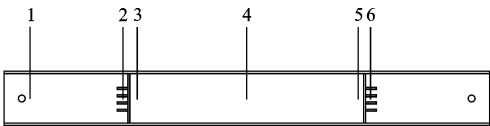


图 20 代表点位置

Fig. 20 Positions of Representative Points

表 2 公式计算结果与有限元计算结果对比

Tab. 2 Comparison of Calculation Results Between  
Formula and Finite Element

构件类型	内力	位置	$N_u$	$N_e$	$N_u/N_e$
顶梁	轴力/kN	T1	1 141.22	1 080.18	1.06
		T4	21.59	22.03	0.98
	剪力/kN	T1	-39.00	-35.95	1.08
		T4	-84.23	-81.50	1.03
	弯矩/(kN·m)	T2	-29.43	-27.94	1.05
		T3	56.44	59.86	0.94
		T4	24.88	25.93	0.96
		T5	-15.38	-14.91	1.03
中梁	轴力/kN	M1	485.57	466.76	1.04
		M4	43.18	41.65	1.03
	剪力/kN	M1	-90.40	-90.64	0.99
		M4	-90.40	-90.01	1.00
	弯矩/(kN·m)	M2	-49.96	-55.13	0.91
		M3	35.91	33.31	1.08
		M4	0.00	2.50	0.00
		M5	-35.91	-38.20	0.94
		M6	49.96	54.38	0.92

注:  $M_1 \sim M_6$  表示中梁对应的位置;  $T_1 \sim T_6$  表示顶梁对应的位置;  $N_u$  为公式计算结果;  $N_e$  为有限元计算结果。

于上、下层钢板剪力墙厚度相同的中梁,其剪力值沿梁长方向基本保持不变。

6 结 语

(1)计算钢绞线预拉力时,应考虑由于框架梁压缩变形导致的预应力损失。

- (2)对于绕梁腹板销轴转动的自复位钢板剪力墙结构,梁中锚固钢绞线位置的弯矩最大。
- (3)梁中锚固点至转动点之间的梁段轴力最大;对于上、下层钢板剪力墙厚度相同的中梁,其剪力值沿梁长方向基本保持不变。
- (4)框架梁内力计算公式能够较为准确地计算梁的内力,具有较好的适用性。

参考文献:

References:

[ 1 ] GB 50011—2010,建筑抗震设计规范[S].  
GB 50011—2010, Code for Seismic Design of Buildings[S].

[ 2 ] 张爱林,张艳霞,刘学春.震后可恢复功能的预应力钢结构体系研究展望[J].北京工业大学学报,2013,39(4):507-515.  
ZHANG Ai-lin,ZHANG Yan-xia,LIU Xue-chun. Research Outlook of Earthquake Resilient Prestressed Steel Structures[J]. Journal of Beijing University of Technology,2013,39(4):507-515.

[ 3 ] CHOEK G,LEW H. Model Precast Concrete Beam-to-column Connections Subject to Cyclic Loading[J]. PCI Journal,1993,38(4):80-92.

[ 4 ] CHEOK G,STONE W. Performance of 1/3 Scale Model Precast Concrete Beam-column Connections Subjected to Cyclic Inelastic Loads[R]. Gaithersburg: US National Institute of Standards and Technology, 1994.

[ 5 ] PRIESTLEY M J N,MACRAE G A. Seismic Tests of Precast Beam-to-column Joint Subassemblages with Unbonded tendons[J]. PCI Journal, 1994, 41 (1): 64-81.

[ 6 ] RICLES J,SAUSE R,PENG S W,et al. Experimental Evaluation of Earthquake Resistant Posttensioned Steel Connections[J]. Journal of Structural Engineering,2002,128(7):850-859.

[ 7 ] GARLOCK M M,RICLES J M,RICHARD S. Experimental Studies of Full-scale Posttensioned Steel Connections[J]. Journal of Structural Engineering, 2005, 131(3):438-448.

[ 8 ] GARLOCK M M,SAUSE R,RICLES J M. Behavior and Design of Post-tensioned Steel Frame Systems [J]. Journal of Structural Engineering,2007,133(3): 389-399.

[ 9 ] CLAYTON P M,BERMAN J W,LOWES L N. Seismic Design and Performance of Self-centering Steel Plate Shear Walls[J]. Journal of Structural Engineering,2012,138(1):22-30.

- [10] CLAYTON P M, DOWDEN D M, WINKLEY T B, et al. Experimental Investigation of Self-centering Steel Plate Shear Walls[J]. Journal of Structural Engineering, 2012, 138(7): 1586-1597.
- [11] CLAYTON P M, BERMAN J W, LOWES L N. Sub-assembly Testing and Modeling of Self-centering Steel Plate Shear Walls[J]. Engineering Structures, 2013, 56(6): 1848-1857.
- [12] DOWDEN D M, PURBA R, BRUNEAU M, et al. Behavior of Self-centering Steel Plate Shear Walls and Design Considerations[J]. Journal of Structural Engineering, 2012, 138(1): 11-21.
- [13] 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 Xiao-ning, MENG Shao-ping, SUN Wei-wei. 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.
- [14] 潘振华, 潘 鹏, 叶列平, 等. 自复位钢框架节点有限元模拟及参数分析[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(3): 35-42.  
PAN Zhen-hua, PAN Peng, YE Lie-ping, et al. Modeling and Parametric Study of Beam-to-column Connection for Self-centering Steel Moment Frames[J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(3): 35-42.
- [15] 朱 昱, 李启才. 利用钢板剪力墙耗能的自复位结构有限元模拟[J]. 苏州科技学院学报: 工程技术版, 2013, 26(3): 46-50.  
ZHU Yu, LI Qi-cai. The Finite Element Simulation of Self-centering Structure by Using the Energy Dissipation of Steel Plate Shear Walls[J]. Journal of Suzhou University of Science and Technology: Engineering and Technology, 2013, 26(3): 46-50.
- [16] 经 聪, 李启才. 利用蝴蝶形钢板剪力墙耗能的自复位结构体系研究[J]. 苏州科技学院学报: 工程技术版, 2014, 27(1): 44-50.  
JING Cong, LI Qi-cai. Research on Self-centering System of Energy Consumption of Steel Walls with Butterfly-shaped Links[J]. Journal of Suzhou University of Science and Technology: Engineering and Technology, 2014, 27(1): 44-50.
- [17] 张 磊, 李启才, 纪 瑞. 钢板剪力墙自复位结构体系的抗震性能研究[J]. 苏州科技学院学报: 工程技术版, 2015, 28(3): 19-24.  
ZHANG Lei, LI Qi-cai, JI Rui. Study on Seismic Performance of the Self-centering Steel Plate Shear Wall System[J]. Journal of Suzhou University of Science and Technology: Engineering and Technology, 2015, 28(3): 19-24.
- [18] 王 琦, 李启才, 纪 瑞. 钢板剪力墙自复位结构的设计方法[J]. 广西大学学报: 自然科学版, 2016, 41(3): 641-650.  
WANG Qi, LI Qi-cai, JI Rui. Design of Self-adjusting System of Steel Shear Walls[J]. Journal of Guangxi University: Natural Science Edition, 2016, 41(3): 641-650.
- [19] 蒋成良, 李启才. 钢绞线预应力的改变对自复位钢框架性能影响[J]. 苏州科技学院学报: 工程技术版, 2013, 26(3): 28-31.  
JIANG Cheng-liang, LI Qi-cai. Influence of Prestress Change in Strand on Seismic Behavior of Self-centering Frame[J]. Journal of Suzhou University of Science and Technology: Engineering and Technology, 2013, 26(3): 28-31.
- [20] 王先铁, 马尤苏夫, 郝际平, 等. 钢板剪力墙边缘构件的计算方法研究[J]. 工程力学, 2014, 31(8): 175-182.  
WANG Xian-tie, MA Yousufu, HAO Ji-ping, et al. Calculation Methods for Boundary Elements in Steel Plate Shear Walls[J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(8): 175-182.
- [21] 潘振华. 具有自复位能力的钢框架体系研究[D]. 北京: 清华大学, 2010.  
PAN Zhen-hua. Study of Self-centering Steel Moment Frames[D]. Beijing: Tsinghua University, 2010.
- [22] Dassault Systemes Simulia Corp. ABAQUS Analysis User's Manual Version 6. 10[M]. Johnston: Dassault Systemes Simulia Corp., 2010.